

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інженерно-фізичний факультет**

**Кафедра фізики металів**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

В/о завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є. В., Іващенко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 132 Матеріалознавство**

**на тему: «Вплив швидкості та часу шліфування поверхні сталі Ст3 на  
контактну температуру»**

Виконав:

студент II курсу, групи ФМ-71мп  
Шептуля Андрій Олександрович

\_\_\_\_\_

Керівник:

ст. викладач, к.ф.-м.н. Балахонова Н.О.

\_\_\_\_\_

Консультант Основної частини:

доцент, к.т.н. Котенко І.Є.

\_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.  
Студент (-ка) \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КАФЕДРА ФІЗИКИ МЕТАЛІВ**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – **132 Матеріалознавство («Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»)**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В/о завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є. В. Іващенко

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**

**Шептулі Андрію Олександровичу**

1. Тема дисертації **«Вплив швидкості та часу шліфування поверхні сталі Ст3 на контактну температуру»**, науковий керівник дисертації Балахонова Наталія Олександрівна, к.ф.-м.н. затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження - процес швидкісного шліфування поверхні зразка із сталі Ст3.

4. Вихідні дані - літературні дані та дані переддипломної практики, отримані на ТОВ «Абразив Центр».

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

1. Провести аналіз літературних даних стосовно шліфування металів на великих швидкостях.
2. Поставити експеримент по визначенню температури при шліфуванні зрізків зі сталі Ст3 та визначити, чи є зміна мікроструктури та твердості поверхні зрізків.

3. Побудувати задачу теплопровідності для поширення тепла в зразок зі сталі Ст3 під час шліфування на великих швидкостях.
4. Провести комп'ютерний експеримент, по вивченню розподілу температури по поверхні та вглиб зразка Ст3 під час шліфування на великих швидкостях.
5. Проаналізувати отримані результати та підвести підсумок

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу \_\_\_\_\_

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_

#### 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Котенко І.Є. к.т.н., доцент		
Охорона праці	Зацарна О.В. к.ф.-м.н.,ст. викладач		
Організаційно-економічна частина	Нараєвський С.В. к.т.н., доцент		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А.		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	2	3	4
1	Видача завдання	4.09.2018	
2	Аналіз літературних даних та написання літ. огляду	5.09.2018-30.09.2018	
3	Вибір об'єкту дослідження та проведення експериментів.	1.10.2018-14.10.2018	
5	Виконання комп'ютерних експериментів	15.10.2018-28.10.2018	
6	Написання висновків	29.10.2018-14.11.2018	
7	Оформлення роботи та переліку посилань	15.11.2018-25.11.2018	

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 83 сторінок, 22 рисунка, 24 таблиці, 42 джерела.

ШВИДКІСНЕ ШЛІФУВАННЯ, КУТОВА ШЛІФМАШИНА,  
КОНТАКТНА ТЕМПЕРАТУРА, ПРИПІК, РЕЖИМ ОБРОБКИ

Об'єкт дослідження – процес швидкісного шліфування поверхні зразка із сталі Ст3.

Мета роботи – експериментальне та теоретичне визначення таких параметрів швидкісного шліфування зразка із сталі Ст3, при яких будуть відсутні припіки поверхні і не погіршиться твердість поверхні зразка.

Методи дослідження: чисельний розв'язок одновимірного рівняння теплопровідності; металографічний та дюрOMETричний аналіз, інтерферометрія.

З теоретичної побудови розподілу температурного поля за товщиною зразка та візуального огляду зразків з Ст3, відшліфованих кругами з електрокорунду КПП 1, з'ясовано, що припик може спостерігатись: для кругів Р60, Р80 та Р120 при швидкості шліфування 54 м/с протягом 40 с, 31 с та 38 с, відповідно. Для зазначених кругів при швидкості шліфування 80 м/с протягом 31 с, 27 та 32 с, відповідно.

З'ясовано, що твердість, порівняно з початковим станом, змінювалась тільки при шліфуванні зі швидкістю 80 м/с.

Практичне значення одержаних результатів: результати проведеного дослідження стосовно визначення безприпикового швидкого шліфування поверхні сталі можуть бути застосовані для якісного шліфування поверхонь сталей звичайної якості та ремонту виробів із неї.

Галузі застосування: технології виробництва і ремонту, матеріали для будівництва.

## ABSTRACT

Master thesis: 83 pages, 22 drawings, 24 tables, 42 sources.

SPEED SLEEVING, COAT MACHINE, CONTACT TEMPERATURE,  
BRACKET, MODE OF PROCESSING

The object of the study is the process of high-speed grinding of the surface of the sample from steel St3.

The purpose of the work is the experimental and theoretical determination of such parameters of high-speed grinding of a sample from steel St3, in which there will be no surface bumps and hardness of the surface of the sample will not deteriorate.

Methods of research: numerical solution of one-dimensional heat conduction equation; metallographic and durometric analysis, interferometry.

From the theoretical construction of the distribution of the temperature field over the thickness of the sample and a visual inspection of the samples from Ct3 polished with circles from the electrocorundum of flap disc 1, it was found that the bite can be observed: for circles P60, P80 and P120 at a grinding speed of 54 m/s for 40 s, 31 s and 38 s, respectively. For the specified wheels, the sanding capacity 80 m/s for 3 s, 27 and 32 s, respectively.

It was found that hardness, in comparison with the initial state, varied only when grinding at a speed of 80 m / s.

Practical value of the obtained results: the results of the conducted research concerning the determination of non-stack quick surface grinding of steel surfaces can be used for high-quality polishing of surfaces of steels of standard quality and repair of products from it.

Areas of application: production and repair technologies, materials for construction.

## ЗМІСТ

### Оглавление

ВСТУП .....	8
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....	9
1.1 Властивості та застосування сталі Ст3 .....	9
1.2 Особливості швидкісного шліфування заготовок із сталі .....	12
1.3 Тепловий баланс та температурне поле при шліфуванні .....	15
1.4 Механізм утворення залізної окалини на поверхні сталі .....	22
1.5 Висновки до Розділу 1 .....	26
2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	27
2.1 Підготовка зразків та вимірювання .....	27
2.2 Точність вимірювання мікротвердості .....	28
2.3 Аналіз металографічних зображень і вимірювання твердості в програмі Image-Pro Plus .....	30
2.4 Швидкісне шліфування зразків та вибір шліфувального матеріалу .....	31
2.5 Технічні характеристики інфрачервоного термометру GM-1650 та метод вимірювання середньої температури зразка .....	35
2.6 Визначення висоти нерівності профілю поверхні інтерференційним методом .....	37
2.7 Висновки до Розділу 2 .....	40
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	41
3.1 Моделювання температурного поля під час швидкісної обробки поверхні зразків із сталі Ст3 .....	41

3.2 Експериментальне визначення температури під час швидкісної обробки поверхні зразків із сталі Ст3 .....	43
3.2 Визначення глибини западин та кількості рисок на одиницю площі поверхні сталі Ст3 після обробки кутовою шліфмашиною.....	50
3.4 Визначення твердості поверхні .....	56
3.5 Висновки до Розділу 3 .....	57
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

## ВСТУП

Шліфування відноситься до числа прогресивних методів обробки металів різанням і забезпечує отримання необхідної якості обробленої поверхні при високій продуктивності процесу. Зазвичай досліджують параметри шліфування в умовах виробництва на різних типах приладів, тоді як найбільш поширеним інструментом у побуті є кутова шліфувальна машина. Сучасні побутові кутові шліфувальні машини дозволяють проводити обробку поверхні метала на доволі великих швидкостях (11000 об/хв). У зв'язку з цим постає питання про якість оброблюваної поверхні при використанні великих швидкостей шліфування.

При швидкісному шліфуванні поверхневий шар виробу підлягає тепловому навантаженню, інтенсивність якого коливається в широких межах в залежності від способу проведення процесу. З метою запобігання утворення припиків при шліфуванні кутовою шліфмашиною пропонується виконати комплекс досліджень, який би дозволив виявити оптимальні режими обробки поверхні металів на звичайному побутовому обладнанні виробів зі сталі Ст3. Вироби зі сталі Ст3 обрані для дослідження тому, що є найпоширенішими об'єктами як при використанні на будівництві, так і для звичайних побутових потреб громадян.

В даній роботі досліджений процес поширення тепла за товщиною зразка із сталі Ст3 при його швидкісному шліфуванні.

Мета даної роботи полягає у вивченні закономірностей і особливостей утворення припиків при швидкісному шліфування зразка із сталі Ст3 кутовою шліфмашиною та формулюванні рекомендацій щодо швидкості шліфування та абразивності використаного круга, при яких вищезазначені недоліки обробки виробів не виникають.



## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Властивості та застосування сталі Ст3

Ст3 відноситься до конструкційних вуглецевих сталей звичайної якості [1] з підвищеним вмістом марганцю. За ступенем розкислення сталі при виплавці вони діляться на «киплячі», «напівспокійні» та «спокійні». Тут і далі під сталлю Ст3 будемо розуміти спокійну сталь, опускаючи позначення «сп». У ній відсутній кисень.

Сталь Ст3 характеризується однорідною (гомогенною) структурою, яка завдяки своїй природі покликана надавати сплаву пластичність і максимальний захист від впливів навколишнього середовища, тобто запобігати корозії. Вироби зі сталі Ст3 не схильні до відпускнуї крихкості, не флокенечутливі та можуть зварюватись без обмежень. Способи зварювання: ручне дугове, автоматична дугова під флюсом і газовим захистом, електрошлакове, контактно-точкова. Для товщини більш 36 мм рекомендується підігрів і подальша термообробка. Температура початку кування – 1300 °С. Температура кінця кування – 750 °С. Охолодження на повітрі.

Сталь марки Ст3, згідно ДСТУ 2651: 2005. [2], прийнятому в 2005 році, застосовують у будівельних конструкціях під час спорудження жорстких ферм і інших металоконструкцій, несучих елементів. З цієї марки стали роблять:

1. листової і фасований прокат (лист сталевий Ст3);
2. заготовки арматури і деталі для трубопроводів (квадратна труба Ст3);
3. основні та другорядні елементи для залізничного господарства, підвісних і наземних шляхів і ін.

Вироби з Ст3 призначені для експлуатації в діапазоні від -40 °С до +425 °С при змінних навантаженнях.

Сталі звичайної якості поставляються в гарячекатаному стані. Їх структура і властивості задані при отриманні виробів на металургійному заводі. Тому при виготовленні деталей на підприємствах-споживачах металу

без використання гарячої обробки механічні властивості сталі будуть відповідати рівню, гарантованому Державним Стандартом (ДСТУ 2651:2005. [2]) для заданої марки.

Якщо з цих сталей отримують вироби з використанням гарячої обробки (кування, штампування), то структура і, як наслідок, властивості сталі змінюються. Для покращання структури і властивостей після виготовлення вироби гарячої обробки тиском можуть піддаватись термічній обробці – відпалу або нормалізації.

Металургійні заводи випускають сталі звичайної якості в вигляді прокату самого різного профілю і розмірів. Це можуть бути прутки круглого, квадратного, шестигранного перерізу; кутники, швелери, листи, труби, балки тощо.

Температура критичних точок сталі Ст3 [2]. Нагрів та охолодження доевтектоїдної сталі відповідно -  $A_{c1} = 735\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $A_{m1} = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $A_{r1} = 680\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $A_{n1} = 835\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура плавлення Ст3 [2]  $T_{пл} = 1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ , питома теплота плавлення -  $q_{пл} = 2779\text{ кДж/кг}$ .

Основою структури стали є ферит. Він є дуже міцним і пластичним, цементит навпаки, крихкий і твердий, а перліт має проміжні властивості. Властивості фериту не дозволяють застосовувати його в будівельних конструкціях в чистому вигляді. Для підвищення міцності фериту сталь насичують вуглецем (стали звичайною міцності, маловуглецеві), легують добавками хрому, нікелю, кремнію, марганцю та іншими елементами (низьколеговані сталі з високим коефіцієнтом міцності) і легують з додатковим термічним зміцненням (високоміцні сталі).

До шкідливих домішок відносяться фосфор і сірка. Фосфор утворює розчин з феритом, таким чином знижує пластичність металу при високих температурах і підвищує крихкість при низьких. Утворення сірчистого заліза при надлишку сірки призводить до червоноламкості металу. У складі стали Ст3 допускається не більше 0,05 % сірки і 0,04 % фосфору.

При температурах, недостатніх для утворення феритної структури можливе виділення вуглецю і його скупчення між зернами і біля дефектів кристалічної решітки. Такі зміни в структурі стали знижують опір крихкому руйнуванню, підвищують межу плинності та тимчасового опору. Це явище називають старінням, в зв'язку з тривалістю процесу структурних змін. Старіння прискорюється при наявності коливань температури і механічних впливах. Насичені газами і забруднені стали схильні до старіння в найбільшій мірі.

Сталі марок Ст1, Ст2, Ст3, 10 і 15 не гартуються через незначний вміст вуглецю. З метою підвищення твердості, зносостійкості маловуглецевої сталі проводять цементацію - поверхнєве дифузійне насичення вуглецем. Процес у разі використання твердого карбюризатора проводиться при температурах 900 °С - 950 °С, при газовій цементації (газоподібний карбюризатор) - при 850 °С - 900 °С. Після цементації вироби піддають термообробці, що приводить до утворення мартенситної фази в поверхневому шарі виробу (гарт на мартенсит) з наступним відпуском для зняття внутрішніх напружень. Хімічний склад сталі Ст3 наведений в таблиці 1.1.

Таблица 1.1 - Масова доля елементів (%) в сталі Ст3 [1]

	C	Mn	Si	S	P	As	Cr, Ni,Cu	N
Масова доля елементів (%)	0.14- 0.22	0.4-0.65	0,15- 0.3	до 0,05	до 0,04	до 0,08	до 0,3 кожний	0,01

Зарубіжні аналоги марки стали Ст3 [1]:

- США - GradeB, K02101, K02102, K02301;
- Німеччина - StE255;
- Японія - SM400B, SM400C, SM41B, SM41C.

Твердість матеріала зі сталі Ст3 залежить від типу її обробки і знаходиться за Бринелем біля значення  $HV 10^{-1} = 131$  МПа.

В таблиці 1.2 наведені основні механічні властивості сталі Ст3 [2].

Таблиця 1.2 – Механічні властивості гарячекатаної листової сталі Ст3 при 20 °С при перерізі від 20 мм до 40 мм [2]

Густина	Коефіцієнт лінійного розширення	Модуль пружності	Модуль зсуву	Коефіцієнт Пуассона	Межа плинності умовна	Межа міцності при розтягуванні	Відносне видовження після розриву
$\rho$	$\alpha$	$E$	$G$	$\nu$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$
кг/м <sup>3</sup>	1/К	МПа	МПа	м/с	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	%
7850	$12 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	0,3	235	30-480	25

В таблиці 1.3 наведені основні теплові властивості сталі Ст3 [2].

Таблиця 1.3 – Теплопровідність  $\lambda$  сталі Ст3 [2]

Температура $T, ^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700
Теплопровідність $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	55	54	50	45	39	34	30

## 1.2 Особливості швидкісного шліфування заготовок із сталі

За швидкістю різання шліфування поділяють на 3 види:

- 1) звичайне (25-30) м/с;
- 2) швидкісне (35-60) м/с;
- 3) високошвидкісне (більше за 60 м/с).

В процесі абразивного шліфування деталей із загартованих сталей існує велика ймовірність пошкодження їх поверхні внаслідок виникнення припиків

(рис. 1.1), які є одним з найбільш поширених і складних дефектів при роботі «жорсткими» абразивними інструментами [3].

Це пов'язано з перетворенням роботи різання в теплоту. Їх джерелом служать абразивні зерна, які з урахуванням розташування в радіальному напрямку поділяють на три групи: ріжучі, що дають, і неріжучі. Найбільш виступаючі абразивні зерна спочатку виробляють пружну деформацію металу, потім пластичну, і після досягнення контактних напружень, що перевищують межу міцності металу, зняття стружки. Тепло утворюється в основному в результаті тертя абразивних зерен по поверхні тільки що обробленого металу і енергії, що витрачається на пружну і пластичну деформацію.



Рисунок 1.1 – Плями припіку на поверхні сталі Ст3, що утворилися після сухого шліфування

При цьому на перших двох етапах контакту ріжучих зерен з металом температура поверхні, що шліфується, виявляється навіть вище, ніж при знятті стружки. Зерна, що тиснуть на поверхню, лише ковзають по раніше обробленій поверхні, викликаючи додатково пружну і пластичну деформацію і

тепловиділення. Миттєвий нагрів поверхні заготовки може складати  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  і призводить її до локального оплавлення. При цьому швидкість нагріву досягає  $5000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  –  $6000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$  [4,5]. Теплове поле заготовки характеризується високим градієнтом і зосереджується в поверхневому шарі глибиною до  $0,1\text{ мм}$  -  $0,3\text{ мм}$ . Практично за частки секунди ця температура знижується, так як основна частина тепла відводиться в нижні шари холодного металу. При інтенсивному зніманні металу температури нагріву можуть бути вище фазового перетворення (лінії  $A_{c1}$ ). Нагрітий метал, взаємодіючи з охолоджуючим середовищем, набуває знижену або підвищену твердість поверхневого шару деталі. При цьому в сталях з мартенситною і сорбітною структурою можливий вторинний гарт [3-6].

В роботах [7–9] припіки класифіковані за двома групами: загартування і відпустки. У першому випадку в результаті нагрівання металу вище лінії  $A_{c1}$  аустеніт, що утворюється при шліфуванні, під час охолодження деталей не досягає повного зворотного мартенситного перетворення. Це пов'язано з тим, що в результаті великих питомих тисків, що надаються абразивними зернами на їх поверхні, і швидкості руху теплового джерела, нижня межа мартенситного перетворення зміщується нижче на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В результаті на поверхні деталі фіксується структура аустеніту гарту, який може мати дві схеми перетворень: дифузійну «мартенсит - перліт - аустеніт» і бездифузійну «мартенсит - аустеніт». У першому випадку відбувається вихід вуглецю з кристалічної решітки мартенситу в зоні температури відпустки, а при подальшому підвищенні нагріву відбувається розчинення вуглецю та перетворення у  $\gamma\text{-Fe}$ , тобто утворюється аустеніт. Бездифузійна схема зворотного мартенситного перетворення передбачає тільки спотворення кристалічної решітки при мінімальному часу впливу теплового джерела ( $10\text{ с}$  -  $11\text{ с}$ ). Припіки другої групи протікають в третьому перетворенні при відпуску, коли вуглець повністю виходить з решітки мартенситу. При цьому утворюється ферит, а в результаті реакції між ним і вуглецем утворюється цементит (або перліт). Зменшення твердості, обумовлене припіками, справляє

негативний вплив на втомну міцність, зносостійкість і, як наслідок, довговічність виробів [10]. У зв'язку з цим при шліфуванні високонавантажених і відповідальних виробів контролю якості поверхонь і методам усунення припиків приділяється велика увага.

### 1.3 Тепловий баланс та температурне поле при шліфуванні

Для того, щоб визначити параметри шліфування (швидкість обертів, час шліфування), при яких відсутній припик, потрібно скласти тепловий баланс. Згідно з [3], загальна потужність  $N$  теплового потоку, що утворюється в зоні контакту круга із заготовкою при шліфуванні, розраховується за формулою:

$$N = V \cdot P_z, \quad (1.1)$$

де  $P_z$  — дотична сила різання при шліфуванні;

$V$  — швидкість шліфування, м/с.

Тепло, що утворюється в зоні різання при шліфуванні, розподіляється наступним чином:

$$\Theta_T = \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4 + \Theta_5 \quad (1.2)$$

де  $\Theta_1$  — тепло, що переходить в оброблювану заготовку;

$\Theta_2$  — тепло, що переходить в шліфувальний круг;

$\Theta_3$  — тепло, що переходить в стружку;

$\Theta_4$  — тепловіддача за рахунок випромінювання;

$\Theta_5$  — тепло, що виходить із мастильно - охолоджуючими технологічними середовищами (в разі, якщо вони використовуються при шліфуванні).

Тепловий баланс в [3], спираючись на роботи [11-13], пропонується усереднено розділити відповідно до значень таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 — Тепловий баланс при шліфуванні (у відсотках) [3]

тепло, що переходить в оброблювану заготовку	тепло, що переходить в шліфувальний круг	тепло, що переходить в стружку	тепловіддача за рахунок випромінювання	тепло, що виходить із мастильно - охолоджуючим и техноло- гічними
$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$	$\Theta_4$	$\Theta_5$
(45-80) %	(10-45) %	(3-20) %	(1-3) %	(4-17) %

Температуру, що виникає в процесі шліфування можна, розділити на кілька видів:

1) миттєву температуру  $T_m$ , яка розвивається безпосередньо в зоні контакту одиничного абразивного зерна. Миттєві температури розвиваються стрімко швидко і досягають максимальних величин;

2) контактну температуру  $T_k$ , що є середньою по висоті шліфувального круга в зоні контакту з оброблюваною поверхнею;

3) середню температуру  $T_c$  на оброблюваній поверхні заготовки.

Експериментально визначити миттєву температуру досить складно, так як вона розвивається безпосередньо в контакті одиничного ріжучого зерна шліфувального круга. При високошвидкісному шліфуванні [13] величина миттєвої температури на ріжучих зернах може досягати температури плавлення оброблюваного матеріалу. Такі температури частково змінюють фізико-хімічні властивості оброблюваного матеріалу, створюючи умови для адіабатичного зсуву металу і сприяють відокремленню стружки. З іншого боку, високі миттєві температури, що виникають на ріжучих зернах, викликають їх мікроруйнування з утворенням нових різальних крайок, що підвищує ріжучу здатність шліфувального круга. Процес мікроруйнування абразивних зерен йде інтенсивніше при наявності в зоні контакту мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ, особливо з високими охолоджувальними властивостями, що створюють великі градієнти



температур на поверхні зерен. Збільшенню контактних температур сприяє адгезія і схоплювання між абразивним інструментом і оброблюваним матеріалом.

«Налипання» на ріжучі абразивні зерна оброблюваного матеріалу приводить до зміни умов різання і можливого їх руйнування. Зниження миттєвих температур досягається шляхом введення в зону обробки поверхнево-активних речовин і спеціальних присадок до мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ, що зменшують ймовірність схоплювання і утворюють на абразивних зернах захисні мікроплівку.

Контактна температура розвивається в зоні контакту і може бути з достатньою точністю експериментально визначена в кожній точці по висоті шліфувального круга. Контактні температури значно нижче миттєвих, що пов'язано з інтенсивним тепловідводом із зони різання, особливо в разі застосування мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ [12].

Тепловідведення із зони шліфування відбувається всередину обсягу шліфований заготовки і є результатом двох основних факторів :

1) великого градієнта температур між нагрітим до високих температур граничним шаром оброблюваного матеріалу і відносно низькою температурою основної маси заготовки;

2) великого обсягу і маси заготовки в порівнянні з об'ємом і масою нагрітого граничного шару.

Таким чином, кращий тепловідвід із зони шліфування буде на більш масивною заготівлі при використанні мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ з високою теплоємністю. Збільшення контактної температури призводить до зростання залишкових напруг, зміни мікротвердості і виникненню припикання в поверхневому шарі обробленої заготовки.

Середня температура на оброблюваній поверхні і заготівлі в цілому характеризує теплові процеси на всій оброблюваній поверхні і заготівлі. Середня температура впливає на якість обробленої поверхні і на точність

одержуваних розмірів. Температура оброблюваної заготовки безпосередньо пов'язана з тепловими змінами розмірів і форми окремих її елементів. При необхідності отримання особливо точних розмірів контрольні і кінцеві вимірювання проводять при певній температурі обробленої поверхні і заготовки в цілому.

Для визначення миттєвої температури в зоні контакту можна скористатися виразом з [15], де була вирішена аналітична задача про тепловиділення на ділянці контакту при шліфуванні:

$$T_M = k \cdot f \cdot p (lV)^{0.5} \cdot (c \rho \lambda)^{-0.5}, \quad (1.3)$$

де  $k$  — постійний коефіцієнт;

$f$  — коефіцієнт тертя абразивного зерна по оброблюваному матеріалу;

$p$  — тиск в точці контакту, Н/м<sup>2</sup>;

$l$  — довжина зони контакту, м;

$V$  — швидкість шліфування, м/с.

$c$  — питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг К);

$\rho$  — густина оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К.

Один з методів визначення контактної температури при шліфуванні спирається на метод джерел, запропонований вперше академіком Рикалінім Н. Н. [16, 17].

Головне положення методу джерел полягає в наступному: джерело будь-якої форми, що рухається або нерухоме, може бути представлено як система точкових миттєвих джерел.

В основі математичного апарату методу джерел лежить опис температурного поля, що виникає в необмеженому тілі під дією тепла, внесеного імпульсом у вигляді миттєвого точкового джерела.

Використовуючи отримані дані, можна описувати температурні поля, що виникають під впливом різних за видом джерел теплоти. У практичних завданнях розглядаються наступні види джерел теплоти:

- точкове джерело;
- лінійне джерело;
- плоске джерело;
- смугове джерело;
- похиле смугове джерело.

Точкове джерело, яке рухається безперервно, дає температурне поле, змінне з часом – не стаціонарне. Якщо точкове джерело припиняє рух, то настає стаціонарний стан, при якому ізотерми температурного поля будуть являти собою концентричні сфери.

Лінійне джерело створює двовимірне не стаціонарне температурне поле з щільністю теплового потоку, що представляє собою кількість тепла, яке виділяється на одиниці довжини в одиницю часу. Стаціонарний стан для таких джерел практично не настає, тому що при його зупинці температура у всіх точках навколишнього його простору буде наближатись до нескінченності.

Плоске джерело можна розглядати як нескінченно велике джерело з одновимірним температурним полем. Подібний вид джерел реалізується при врізному шліфуванні та деяких схемах глибинного шліфування.

Смугове джерело являє нескінченно довгу смугу певної ширини, розташованої в площині, уздовж однієї з осей, вдовж якої він рухається. Така схема руху найбільш часто зустрічається при всіх видах шліфування.

Похиле смугове джерело є окремим випадком смугового і зустрічається в тих випадках, коли глибина шліфування досить велика і джерело тепла становить певний кут з площиною руху.

Якщо допустити, що оброблювання поверхні відбувається тільки абразивними зернами, то процес шліфування можна уявити, як суму процесів мікрорізання на окремих зернах. В цьому випадку загальний тепловий потік,

спрямований в оброблювану поверхню, легко підрахувати, знаючи число ріжучих зерен на одиниці площі поверхні інструменту в будь-який момент часу, шляхом інтегрування теплового потоку від одиничного зерна по всій зоні контакту. Однак в цьому випадку виникає значна похибка вже на етапі отримання вихідної інформації. Похибка пов'язана, перш за все, з визначенням числа ріжучих зерен на робочій поверхні шліфувального круга.

По-перше, число абразивних зерен на поверхні кола постійно змінюється, так як частина зерен зношується, деякі зерна вибиваються з зв'язки або частково руйнуються силами різання, частина зерен виступає з глибини зв'язки і вступає в роботу.

По-друге, не всі абразивні зерна, що знаходяться на робочій поверхні шліфувального круга, беруть участь в роботі різання. Частина зерен тільки пластично деформує оброблювану поверхню, створюючи велику силу тертя, і при цьому не виконують роботу різання. Відсоток ріжучих і пластично деформуючих зерен постійно змінюється, і ця зміна залежить від характеристик шліфувального круга і режимів обробки.

По-третє, абразивні зерна в обсязі шліфувального круга розташовуються випадковим чином. Виступаючи на поверхню кола при його зношуванні, вони мають велику різновисотність над поверхнею зв'язки, займають довільне положення в просторі, утворюють різні кути різання і створюють різні за площею точкові джерела тепла [16].

Крім того, в теплоутворенні, крім ріжучих, пластично і пружно деформуючих зерен, активну участь бере зв'язка шліфувального круга і стружки, утворені в зоні обробки і знаходяться на робочій поверхні і в порах інструмента.

Контроль за кількістю абразивних зерен на робочій поверхні шліфувального круга практично неможливий. Потрібне або візуальне, або з використанням профілографа, топографування шліфувального інструменту з метою визначення кількості зерен на одиниці площі його робочої поверхні.

У зв'язку з цим, більшість дослідників пропонують вважати джерело теплоти, що виникає при шліфуванні, суцільним. Це не суперечить фізиці процесу, так як спільний хаотичний вплив ріжучих і деформуючих зерен, зв'язки шліфувального круга, стружок і продуктів зношування призводить до постійної зміни сполошеності потоку теплоти в окремій точці контакту інструменту з заготовкою. Але в процесі контакту бере участь велика кількість мікроджерел і порушення суцільності компенсується практично миттєвим відновленням потоку в цій точці та розривом в іншій. В результаті працюючий шліфувальний круг можна уявити як суцільне джерело тепла з усіма особливостями, характерними для рухомого контакту.

Спираючись на положення про суцільному характері потоку тепла при шліфуванні, В. А. Сипайло [18, 19] розробив розрахунковий метод, що дозволяє не тільки визначити температуру в будь-якій точці шліфованої заготовки, а й показати розвиток всього температурного поля.

Метод заснований на побудові ізотерм, що характеризують температурне поле, що розвивається як по площі контакту інструменту з заготовкою, так і по глибині матеріалу заготовки. Вихідними даними є:

- швидкість різання  $V$ , м/с;
- швидкість дотичній подачі заготовки, м/хв;
- глибина різання  $h$ , мм; коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу  $\lambda$ , Вт/м<sup>2</sup>/с;
- коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу  $\lambda$ , Вт/(м<sup>2</sup>К);
- діаметр  $D$  і висота  $H$  шліфувального круга, мм.

Ізотерми будуються по чисельним результатам рішення рівняння:

$$T_c = \frac{2qa}{\pi\lambda V} \int_{Z-Z_H}^{Z+Z_H} \exp(-\xi) \cdot K_0\left(\sqrt{t^2 + \xi^2}\right) d\xi \quad (1.4)$$

де  $q = P_z V / S$  — ефективна потужність джерела, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  — площа контакту круга із заготовкою;

$a$  — температуропровідність матеріалу заготовки,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$V$  — швидкість різання,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності заготовки,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ ;

$t$  і  $Z$  — безрозмірні час та координата;

$Z_H = V_{S_k} S / (2ha)$  — безрозмірна півширина джерела;

$K_0(\sqrt{t^2 + \xi^2})$  — функція Бесселя 0-го порядку від  $\sqrt{t^2 + \xi^2}$ ;

$\xi = z / \sqrt{a\tau}$  — безрозмірна змінна інтегрування.

Використовуючи формулу (1.4), у відносно грубому наближенні (без урахування деформації зерен шліфувального круга і оброблюваного матеріалу [20]) можна побудувати температурне поле в поверхневому шарі заготовки. Побудова температурних полів дозволяє моделювати тепловий вплив шліфувальних кругів на оброблювану поверхню і передбачати появу припиків.

#### 1.4 Механізм утворення залізної окалини на поверхні сталі

Залізна окалина є продуктом окислення металу. Утворення залізної окалини пов'язано з процесами термічної обробки або обробки металу тиском при високих температурах [21].

На поверхні сталевого прокату завжди присутній окисний шар. Склад і структура окисних сполук буде залежати від марки сталі, складу навколишнього середовища, температури, режиму термообробки, наявності та кількості окислювачів, наприклад кисню і ряду інших чинників.

У сухому повітряному середовищі при низьких температурах виникають дуже тонкі окисні плівки, які неможливо побачити навіть при збільшенні поверхні металу під мікроскопом. При збільшенні температури товщина окисного шару збільшується, і виходять добре помітні окисні шари.

При виробництві прокату поверхня металу часто піддається високотемпературному впливу в присутності кисню повітря, що призводить

до утворення товстого багат шарового окисного шару, званого окалиною (а при шліфуванні – припіком [9]).

При окисленні утворюються різні оксиди заліза, такі як  $\text{FeO}$  (в'юстит),  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (магнетит),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (гематит). Гематит і магнетит є вельми щільними структурами і міцно з'єднані один з одним через проміжну структуру  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , (рис. 1.2).

Шар в'юстита є відносно пористим, його сполуки як з металом, так і з магнетитом неміцні. Дифузійна проникність магнетиту і гематиту в порівнянні з в'юститом є незначними. Все це зумовлює їх кращу захисну дію проти окислення. Структура оксидної плівки залежить від температури і від складу окислюючої атмосфери. У кисневомісткій атмосфері при температурі вище  $570^\circ\text{C}$  оксидна плівка складається з трьох шарів. Зовнішній шар  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  міцно пов'язаний із середнім, які мають склад і кристалічну структуру магнетиту. Внутрішній шар - в'юстит, характеризується підвищеною крихкістю і пористістю.

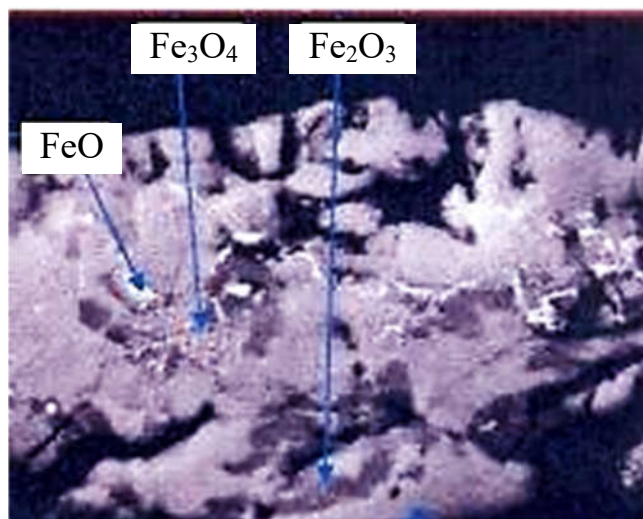


Рисунок 1.2 - Складові окалини на поверхні металопрокату [21]

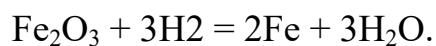
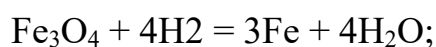
Контакт внутрішнього і середнього шарів неміцний. Тому, оксидна плівка легко відшаровується і має малий електроопір.

При температурі нижче 570 °C закисна фаза стає нестійкою і розпадається по реакції:



Тому, в даному випадку оксидна плівка, практично складається з магнетиту і гематиту.

Відновлення отриманої оксидної плівки відбувається за реакціями:



Відновлений шар складається з практично чистого заліза.

Залежність швидкості перетворення окислів від температури представлена на рисунку 1.3.

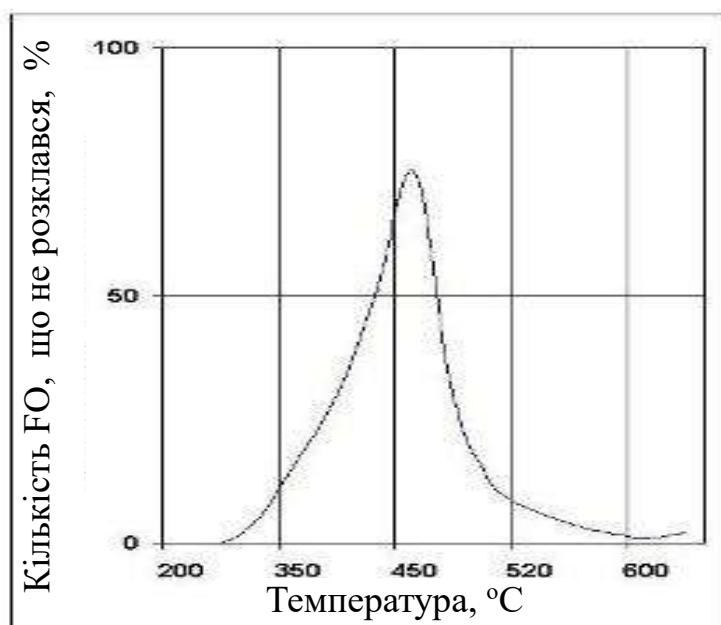


Рисунок 1.3 – Залежність швидкості перетворення окислів від температури [21]



Будова окалини на поверхні прокату в основному відповідає правилу послідовності перетворень. Спочатку до металу примикає в'юстит, потім магнетит, і потім зовнішній шар - гематит. В'юстит легко розчинний в мінеральних кислотах, на відміну від магнетиту і гематиту. Магнетит в меншій мірі розчиняється в кислотах. Гематит вважається нерозчинним з'єднанням.

Тришарове утворення залізної окалини виходить тільки при температурі понад  $570^{\circ}\text{C}$  і при високому вмісті кисню, а також при швидкому охолодженні. В інших умовах утворюється двошарова, або одношарова залізна окалина. Якщо окислення заліза проходить при температурі менше  $570^{\circ}\text{C}$ , то шар в'юстита утворюється у вигляді дуже тонкої плівки під шаром окалини, яка складається з магнетиту і гематиту. Чим нижче температура, тим тонше шар в'юстита. Якщо процес окислення відбувається при температурі  $700^{\circ}\text{C}$ , то товщина шару в'юстита буде 100 мкм, шару магнетиту - 10 мкм, а гематиту - 1 мкм. Якщо окалина утворюється при низькому вмісті кисню і високому вмісті водяної пари, або оксидів вуглецю, особливо при температурі понад  $1000^{\circ}\text{C}$ , то в складі окалини не виявляється гематиту, так як він відновлюється.

Окалина заліза, що утворюється на поверхні прокату, являє собою суміш різних фаз, причому склад окалини і її структура будуть визначатися режимом теплової обробки металу. Зазвичай утворюється тришарова окалина заліза, при цьому частка кожного окисного з'єднання в окалині буде залежати від температури окислення. При температурі  $(700-900)^{\circ}\text{C}$  окалина заліза складається з 10 % магнетиту і 90 % в'юстита, а при збільшенні температури понад  $900^{\circ}\text{C}$  і при появі надлишку кисню замість в'юстита починає виникати шар гематиту.

Структура залізної окалини, що виходить в промислових умовах завжди складніша. Це пов'язано з впливом різних легуючих елементів, що знаходяться в сталі, нерівномірністю складу сталі і особливостями виробництва металу.

### **1.5 Висновки до розділу 1**

1. Об'єктом дослідження обраний процес швидкісного та високошвидкісного шліфування зразка із сталі Ст3.
2. Предметом дослідження обране температурне поле, що виникає під час високошвидкісного шліфування зразка із сталі Ст3.
3. Метою дослідження є експериментальне та теоретичне визначення таких параметрів високошвидкісного шліфування зразка із сталі Ст3, при яких будуть відсутні припіки поверхні та мікроструктура і твердість поверхні зразка залишаться в такому ж стані, як і до шліфування.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Підготовка зразків та вимірювання

Як зазначалось вище, для проведення дослідження були обрані зразки зі сталі Ст3, що спричинене широким розповсюдженням виробів зі сталі зазначеної марки, її доброю зварюваністю та невеликою, порівняно з іншими марками, вартістю. Зразки розміром 50 мм х 50 мм х 3 мм вирізались з листового прокату Ст3, ДСТУ 2651:2005 [22]. Для визначення твердості поверхня зразка шліфувалась за стандартною методикою [22].

Після шліфування проводилось вимірювання мікротвердості на твердомірі ПМТ-3, схема якого наведена в [22], за ДСТУ ISO 6507-1:2007 [23-24] при навантаженні 100 г та 50 г. Для визначення похибок вимірювання проводилось для одного відбитку 3–и рази.

Для визначення геометричних параметрів частинок шліфувального матеріалу відбирали проби абразиву. Отримання знімків абразивних частинок та поверхні зразка зі Ст3 проводилось із використанням мікроскопу МСБ–2 з використанням методів світлого поля для збільшень від  $\times 8,3$  до  $\times 100,5$  та інтерферометру МІІІ-3.

Швидкісне шліфування здійснювали за допомогою кутової шліфувальної машини Bosch PWS 700-115 для трьох різних значень швидкості шліфування із застосуванням шліфматеріалів з цирконієвого електрокорунду.

Вимірювання температури в зоні шліфування здійснювали двома незалежними методами. Перший метод – вимірювання безконтактним інфрачервоним термометром виробництва компанії Benetech GM-1650, розрахований для вимірювання в діапазоні від 200 °С до 1650 °С з похибкою у 1,5 °С. Другий метод – голчатою термопарою TP01A, підключеною до мультиметра UNIT-T M 838, який міряє температуру безпосередньо в градусах Цельсія.

Вимірювання шорсткості здійснювали за допомогою інтерферометра МІІІ-3.

Для визначення шагу нерівностей використовували програму Image-Pro Plus.

Розрахунок температурного поля під час швидкісного шліфування здійснювалось з використанням програми Mathcad за формулою (1.4). Mathcad обраний тому, що має вбудовані спеціальні функції, зокрема функцію Бесселя, що входить у формулу (1.4).

## 2.2 Точність вимірювання мікротвердості

Для отримання більш точного результату вимірювали твердість досліджуваної ділянки мікрошліфа два-три рази. Для цього на площу одного і того ж зерна розміщували декілька відбитків.

Необхідно врахувати [24], що при дуже малих навантаженнях можна отримати недостатньо точні результати. Прилад ПМТ-3 дозволяє фотографувати мікроструктуру сплаву з отриманими відбитками.

При визначенні мікротвердості можуть виникати похибки, пов'язані [25]:

- 1) зі станом алмазної піраміди;
- 2) з неточністю у величині прикладеного навантаження;
- 3) з не строгою перпендикулярністю площині шліфа до осі індентора;
- 4) дефектами освітлення;
- 5) помилками вимірювання діагоналі відбитка.

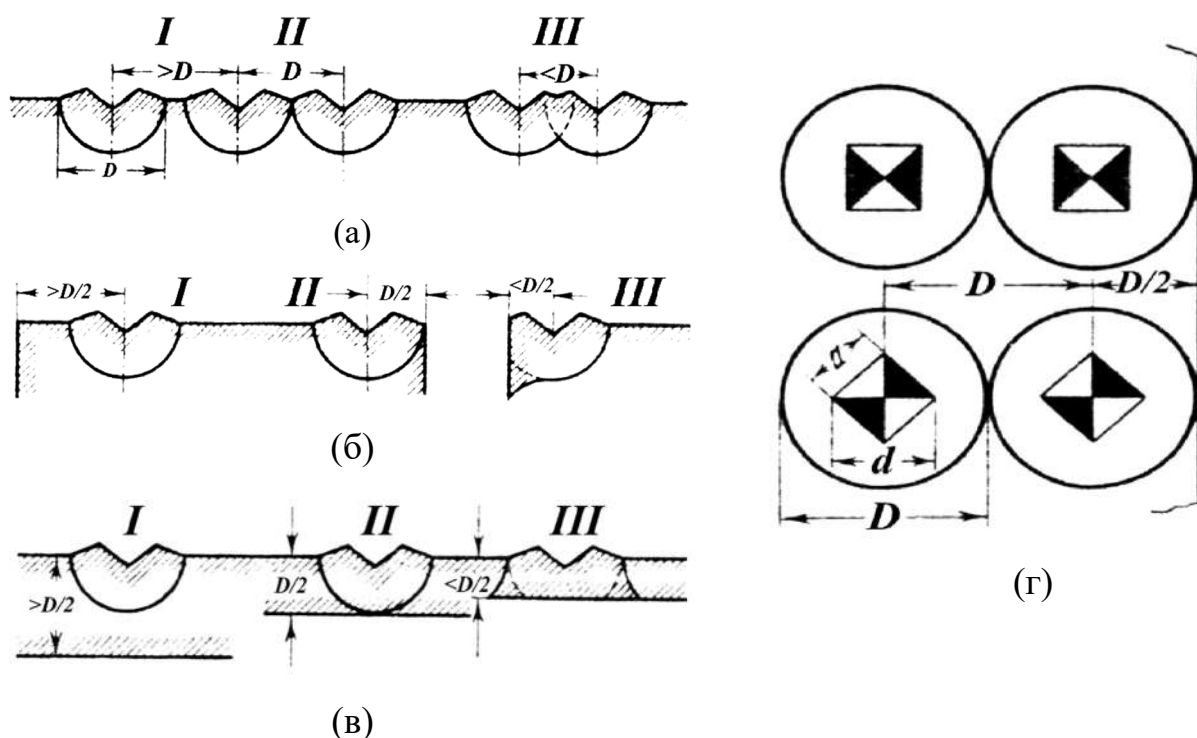
Дефекти алмазної піраміди (скол вершини, не гладкі грані, викришування ребер і т. і.) призводять до отримання неправильних результатів випробування. Фактичне навантаження, з якою алмазна піраміда вдавлюється у випробуваний метал, може бути трохи більше або менше номінальної. Це, природно, обумовлює похибки при визначенні числа твердості.

Зменшення фактичного навантаження, в порівнянні з номінально прийнятою, може бути пов'язано з втратами на тертя в механізмі навантаження.

Збільшення фактичного навантаження на алмазну піраміду може викликатись занадто швидким опусканням механізму навантаження.

Якщо площина шліфа не перпендикулярна осі переміщення індентора, то відбиток виходить у вигляді неправильного квадрата (спотворення форми відбитка у деяких випадках визначається анізотропією або місцевою неоднорідністю випробуваного металу). Щоб уникнути цієї помилки, необхідно ретельно встановлювати шліф на установчу пластину і акуратно впресовувати у пластилін ручним пресом.

Різні умови освітлення призводять до помилок (рис. 2.1).



Деформована зона розміщена: (а) - відносно один одного; (б), (г) – відносно краю зразка; (в) - щодо нижньої поверхні тонкого зразка або покриття

Рисунок 2.1 – Схема розміщення відбитків мікротвердості з позначенням деформованої зони діаметром  $D$  [23]

Помилки виникають через те, що по краях відбитка у багатьох металів і матеріалів при випробуванні утворюється виступ (валик) через виникнення

деформованої зони навколо відбитків і видимі розміри контуру змінюються зі зміною напрямку освітлення.

Для виключення похибок при вимірі мікротвердості в результаті утворення деформованої зони навколо відбитків ДСТУ [22-23] визначено відстані між відбитками і краями зразка,

Сумарна похибка при вимірюваннях на приладі ПМТ-3, наприклад, при збільшенні близько 400 крат досягає  $\pm 0,17$  мкм (середня квадратична похибка). Вочевидь, велика похибка, спостерігається при відбитках малого розміру і менша - при відбитках більшого розміру.

### **2.3 Аналіз металографічних зображень і вимірювання твердості в програмі Image-Pro Plus**

Image-Pro Plus компанії Media Cybernetics [25] є найбільш повним програмним пакетом для професійної обробки і аналізу зображень в наукових дослідженнях, контролю якості, аналізу матеріалів і багатьох інших медичних, біологічних і промислових сферах. Програма розроблялася більше 20-ти років тому і на сьогоднішній день включає в собі всі необхідні професіоналам функції і можливості обробки зображень і вилучення з них кількісної інформації. За рахунок своєї функціональності, розширюваності та програмованості, Image-Pro Plus в даний час є стандартом програмного забезпечення аналізу зображень. Програма відрізняється простим, дружнім й інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та інтегрує в собі текст, дані обчислень і вимірювань (в тому числі статистичні) і графіку. Вбудована Visual Basic-сумісна макромова дозволяє легко адаптувати пакет під специфічні завдання і розширити його можливості. Дана програма дозволяє проводити як прості (вручну), так і складні автоматизовані вимірювання. Абсолютне геометричне калібрування, тісно пов'язане з конкретним пристроєм отримання зображень, забезпечує отримання даних в потрібних одиницях виміру.

Унікальні технології фільтрації та сегментації дозволяють розділити об'єкти, що перекриваються, продовжити «рвані» краї і розпізнати кластери.

Після проведення операції сегментації, кожній групі об'єктів може бути зіставлений певний колір для кращої візуальної ідентифікації та класифікації.

Отримані дані можна порівнювати, аналізувати, візуалізувати з використанням таблиць з довільним сортуванням, гістограм, діаграм розсіювання, лінійних профілів, псевдо фарбування. Програма має інструменти для додавання, віднімання і маскуванню зображень з логічними і арифметичними функціями, а також потужними геометричними перетворювачами для просторової обробки. Для зручного архівування, документування та подальшого статистичного аналізу, результати можна передати в Excel або в інші електронні таблиці через Direct Data Export [26].

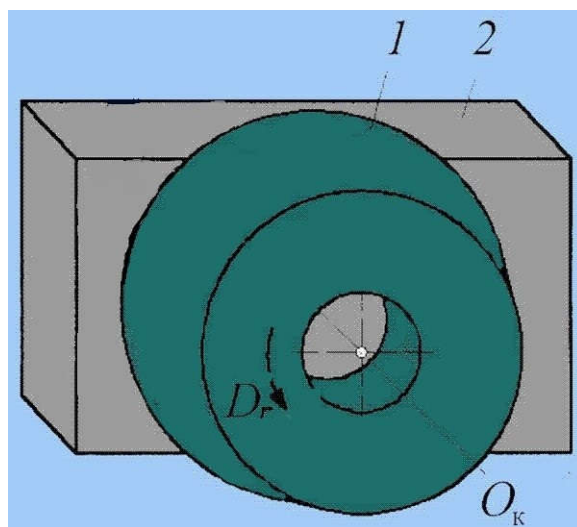
## **2.4 Швидкісне шліфування зразків та вибір шліфувального матеріалу**

Швидкісне торцеве шліфування зразків (рисунок 2.2) здійснювалось на кутовій шліфмашині Bosch GWS 850-125, в якій можна встановлювати швидкість шліфування 13,5 м/с, 27 м/с, 40,5 м/с, 54 м/с, 67,5 м/с, 80 м/с. Технічні характеристики Bosch GWS 850-125 надані в таблиці 2.1. Шліфування здійснювалось в один прохід.

Велика кількість різноманітних видів дисків для кутової шліфмашини [27] зумовлена великою кількістю застосувань. По виду виконуваних робіт диски ділять на відрізні (обрізні) диски - для розрізання матеріалів, шліфувальні та полірувальні диски, обдирні диски і насадки, заточувальні (зачисні) диски - для заточування інструменту, зачистки металу, очищення сталевих і бетонних поверхонь.

За конструкційним особливостям диски бувають: абразивні - диски з абразивного матеріалу, відрізні, шліфувальні, заточувальні; суцільнометалеві алмазні - сталеві диски з алмазним пилом на робочій поверхні, є відрізні диски і для обдирання / шліфування з боковим алмазним напиленням; суцільнометалеві з зубами - для різання деревини та безліч інших конструкцій

для полірування і обдирання, насадки зі щітками, металеві диски з укріпленим на їх площині різних шліфувальних / полірувальних матеріалів.



1 – шліфувальний круг; 2 – зразок,  $D_r$  – кутова швидкість круга,

$O_k$  – вісь обертання

Рисунок 2.2 – Торцеве шліфування [28]

Таблиця 2.1 Технічні характеристики кутової шліфмашини Bosch GWS 850-125 [28]

Діаметр диска, мм	Споживана потужність, Вт	Корисна потужність, Вт	Напруга, В	Швидкість холостого ходу, об/хвил	Різьба шпинделя,
125	850	490	230	11000	M14

В маркуванні абразивних дисків поєднуються кольори і короткий цифро-літерний код. Основним кольором позначають призначення диска: синій для металу, зелений для каменю, крім цього є відповідний напис. Перші букви позначають використаний абразивний матеріал: А - корунд, С - карбід кремнію, А8 - електрокорунд. Цифра - розмір зерна абразиву, чим менше цифра, тим повільніше і точніше буде відбуватися різка або шліфування, і тим



твердіше може бути оброблюваний матеріал. Остання буква означає твердість зв'язки. Найбільш м'яка - А, з кожною наступною буквою за алфавітом зв'язка все твердіше. Чим зв'язка твердіше, тим м'якше повинен бути оброблюваний матеріал. На диску вказана допустима швидкість обертання, ця швидкість повинна бути більше, ніж швидкість роботи кутової шліфмащини. Іноді ця швидкість вказана у вигляді кольорової смуги із зазначенням швидкості лінійного руху кромки - жовта - 63 м/с, червона 80 м/с, зелена 100 м/с. Важливим показником при виборі дисків є їх лінійні розміри - діаметр / товщина / внутрішній діаметр. Маркування алмазних дисків у великій мірі залежить від виробника, але є деякі загальні правила: використовуються 5 кольорів для призначення диска - синій для бетону і мармуру, зелений для граніту, помаранчевий для цегли, сірий для кераміки, жовтий для кахлю і алебастру; на дисках вказана рекомендована швидкість обертання - при перевищенні її диск або розірве, або може згоріти алмазний абразив. Диски з великими прорізами використовують тільки для сухого різання - вони вимагають регулярного охолодження, мінімум раз на хвилину. Диски з суцільною ріжучою кромкою використовуються в основному для мокрого різання на кутових шліфмащинах спеціальної конструкції; на алмазних дисках відомих виробників встановлюють голографічні логотипи для захисту від підробок.

Шліфування і полірування за допомогою кутової шліфмащини проводиться за допомогою сталевого диска, на одну зі сторін якого закріплений змінний шліфувальний або полірувальний матеріал - наждачний папір, тканину і т.д. Для грубого шліфування використовується абразивний круг з дрібним зерном. Використовуючи послідовно все більш тонкі шліфувальні матеріали, спеціальні абразивні пасти і рідини, за допомогою кутової шліфмащини можна домогтися практично будь-якого необхідного стану поверхні. Пелюсткові диски служать для очищення металу від корозії або фарби. виготовляється у вигляді сталеві основи з великою кількістю сегментів. Такий виріб є ідеальним для шліфування будь-яких матеріалів,

включаючи пластик і сталь. Найбільший діаметр досягає 500 мм, застосовується для ручної і верстатної обробки поверхонь, діаметр посадкового гнізда від 30 мм до 100 мм. Зернистість абразиву - до 500 одиниць. Такі диски призначаються для обробки великих поверхонь. Можливість регулювання швидкості забезпечує високі результати під час полірування поверхні. Пелюсткові диски позначаються як ППТ і виготовляються у двох формах: конусній та плоскій. У порівнянні з жорстким зачисним кругом, ППТ практично не виробляє шуму і не має вібрацій. При цьому забезпечує високий рівень знімання металу і гарна якість поверхні.

У пелюсткових колах найчастіше використовуються три матеріали:

1) оксид алюмінію (ALUMINIUM OXIDE, найчастіше коричневого кольору) - найдешевший і простий абразив. Використовується повсюдно через низьку ціну. Найчастіше в роздрібному продажі представлені ППТ саме з оксиду алюмінію. Застосовуються для обробки кольорових металів, алюмінію, тому що вони все одно швидко "засаливаються" і немає сенсу витрачатися на дорогі кола. Обробка чорної сталі теж популярне завдання для цих кіл, хоча серйозні виробники металовиробів використовують матеріали більш просунутого рівня. Виготовляються в зернистості P40, P60, P80 і P120;

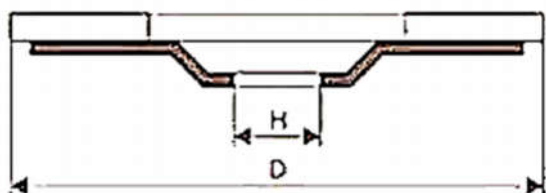
2) цирконат алюмінію (ZIRCONIA ALUMINA, цирконієвий корунд, найчастіше синього кольору , рідше зеленого) - найпоширеніший матеріал для ППТ серед підприємств, що працюють з металовиробами. Абразивний матеріал ZK поєднує в собі високу продуктивність при роботі з конструкційними/ і легованими сталями, велику довговічність поряд з помірною ціною. Також успішно застосовується для обробки нержавіючих сталей, так як не викликає подальшої корозії зон обробки. Виготовляються в зернистості P40, P60, P80 і P120;

3) керамічне зерно (CERAMICS, найчастіше червоного кольору і його темні відтінки) - найпродуктивніший і дорогий матеріал для виготовлення ППТ. Кераміку використовують для найскладніших і важких завдань, де інші кола не впораються, а також клієнти які найбільше цінують свій час і якість

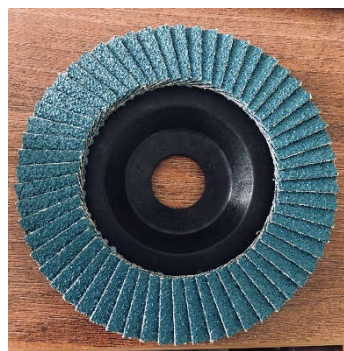
продукції, що випускається. Найкраще такі ППТ працюють з нержавіючими, жароміцних та іншими легованими сталями, де потрібно отримувати менше припиків і максимально швидко обробляти метал. Виготовляються в зернистих Р40, Р60 і Р80, значно рідше Р120.

Крім абразивного зерна, важливо щоб в ППТ використовувалася правильна основа і зв'язуючий матеріал.

В даній роботі використовували круг пелюстковий пакетний 1 (КПП 1), (рис. 2.3) із електрокорунду на 125 мм із зерном Р80, Р100 та Р120. Шліфування проводили на трьох швидкостях, 54 м/с, 67.5 м/с, 80 м/с, що відповідають положенню покажчика швидкості 4, 5, 6 відповідно.



(a)



(б)

(a) – креслення форми шліфувального круга та його товарний вигляд (б)  $D$  - діаметр отвору,  $H$  - висота заглиблення

Рисунок 2.3 – Круг пелюстковий пакетний 1 [28]

## 2.5 Технічні характеристики інфрачервоного термометру GM-1650 та метод вимірювання середньої температури зразка

GM-1650 безконтактний інфрачервоний радіаційний термометр виробництва компанії Venetech призначений для безконтактного вимірювання температури. Принцип дії пірометра заснований на вимірюванні потужності теплового випромінювання об'єкта в інфрачервоному діапазоні. В приладі використаний закон випромінювання абсолютно чорного тіла і вже враховано те, що міряється радіаційна температура з коефіцієнтом чорноти 0.95. Прилад

GM-1650 забезпечує точне вимірювання температури в діапазоні від 200 °C до 1650 °C [30]. Особливостями пірометра GM-1650 є: можливість установки коефіцієнта випромінювальної здатності, функція збереження і відтворення даних вимірів, велика точність вимірювань ( $\pm 1,5$  °C), функції індикації низького заряду батареї і автоматичного вимкнення при тривалій бездіяльності приладу, підсвічування РКІ дисплея і лазерний покажчик. Також GM-1650 оснащений додатковою функцією утримування результатів вимірювання на дисплеї, функцією відображення максимального/мінімального/середнього значення і різниці значень температури поверхні, функцією вибору одиниць виміру, функція звукового попередження при досягненні встановлених значень температури та лазерним наведенням на об'єкт вимірювання. Даний пірометр має оптичну роздільну здатність 50:1 та працює на довжині хвилі (8 – 14) мкм. Зазначимо, що роздільна здатність 50:1 означає, що на відстані 1 м пірометр міряв випромінювання від ділянки зразка діаметром 2 см, тобто розмір зразка повинен бути більшим 2 см.

Перед вимірюванням температури на поверхні сталі Ст3 визначали ступень чорноти поверхні за методикою, запропонованою в [30]. Для цього на поверхню зразка із сталі Ст3 наклеювали чорну липку стрічку діаметром 2 см і нагрівали зразок. Пірометр розташовували від зразка не більше, ніж на 1 м (роздільна здатність 50:1) і знімали нагрівання зразка як від чорної, так і від сірої ділянок поверхні. на поверхні чорної липкої стрічки контролювалось за допомогою термопари TP01A, підключеної до мультиметра UNIT-T M 838 і відразу показувала температуру в градусах Цельсія.

Потік випромінювання  $\Phi_{\text{вим}}$ , що падає на пірометр, складається з потоку власного випромінювання тіла  $\Phi_{\text{влас}}$  і потоку відбитого випромінювання сторонніх об'єктів  $\Phi_{\text{відб}}$ :

$$\Phi_{\text{вим}} = \Phi_{\text{влас}} + \Phi_{\text{відб}}. \quad (2.1)$$

Використовуючи закон Стефана-Больцмана [31]:

$$\Phi = a\sigma T^4, \quad (2.2)$$

де  $a$  – ступінь чорноти об'єкта, температуру  $T$  вимірюють,

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана.

Підставляючи (2.2) в (2.1), отримаємо для сірого тіла:

$$a_{\text{вим}} \sigma T_{\text{вим}}^4 = a_{\text{тіл}} \sigma T_{\text{тіл}}^4 + (1 - a_{\text{тіл}}) \sigma T_{\text{відб}}^4, \quad (2.3)$$

де  $a_{\text{вим}}$  – ступінь чорноти, встановлений в пірометрі,

$a_{\text{тіл}}$  – ступінь чорноти тіла, температуру якого вимірюють,

$T_{\text{вим}}$  – температура, яку показує пірометр,

$T_{\text{тіл}}$  – температура тіла дійсна.

З (2.3) ступінь чорноти тіла є:

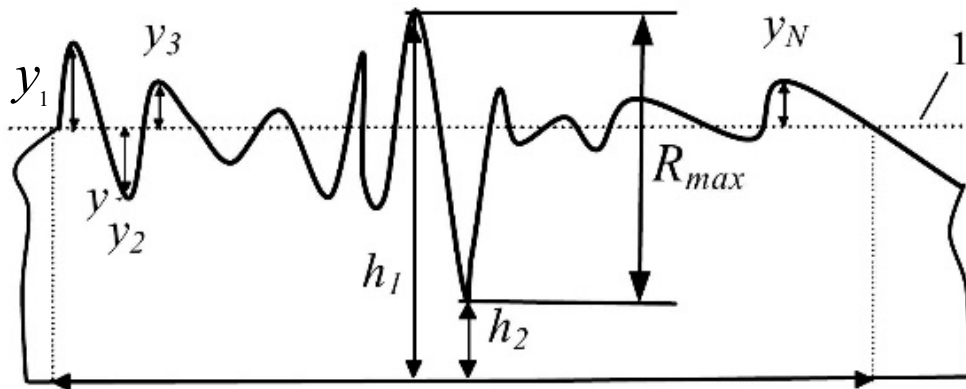
$$a_{\text{тіл}} = (a_{\text{вим}} T_{\text{вим}}^4 - T_{\text{відб}}^4) / (T_{\text{тіл}}^4 - T_{\text{відб}}^4). \quad (2.4)$$

## 2.6 Визначення висоти нерівності профілю поверхні інтерференційним методом

В процесі виготовлення і обробки деталей виникає шорсткість їх поверхонь. Під шорсткістю розуміють сукупність нерівностей, що утворюють рельєф поверхні. Шорсткість поверхні в значній мірі впливає на тертя, зносостійкість, міцність механічних деталей.

Шорсткість поверхні нормується 14-ю класами і оцінюється по системі середньої лінії 1 (рис. 2.3) параметрами висоти нерівностей  $R_a$  і  $R_z$ , вимірюваних в межах базової довжини  $l$  [32].

Базова довжина залежить від класу шорсткості: наприклад, для 9-12 класів вона дорівнює 0.25 мм, для 13-14 класів – 0.08 мм. За середню лінію профілю приймається лінія, що розділяє виміряний профіль таким чином, щоб сума квадратів відстаней  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$  точок профілю до цієї лінії була мінімальною в межах базової довжини.



1 – середня лінія,  $y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$  – відстань точок профілю,

$R_{\max}$  – максимальне відхилення,  $h_1, h_2$  – висоти профілю

Рисунок 2.4 – Профіль поверхні [31]

Параметр  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення точок дійсного профілю від середньої лінії:

$$R_a = \sum_{i=1}^N |y_i| / N \quad (2.5)$$

де  $N$  – число точок виміру,

$y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$  – відстані від максимальних/мінімальних точок профілю до середньої лінії.

Параметр  $R_z$  – середня різниця висот п'яти найвищих  $h_{2k-1}$ , і п'яти найнижчих  $h_{2k}$  ( $k=1, 2, \dots, 5$ ) точок на базовій довжині профілю, виміряних від лінії, що є паралельною до середньої:

$$R_z = \frac{1}{5} [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) + \dots + (h_9 - h_{10})] \quad (2.6)$$

або

$$R_z = \frac{1}{5} \left[ \sum_{i=1}^5 |y_{\max}| + \sum_{i=1}^5 |y_{\min}| \right], \quad (2.7)$$

де  $y_{\max}$  і  $y_{\min}$  відраховуються від середньої лінії профілю (рис. 2.4).

Контроль шорсткості (чистоти) поверхонь є важливим технологічним процесом. Висока точність контролю може бути забезпечена застосуванням безконтактних інтерференційних методів, які базуються на використанні двох і багатопроменевої інтерференції [32].

Інтерференційна картина утворюється при взаємодії світлових пучків, відбитих від зразкового дзеркала і досліджуваної поверхні. Вона являє собою світлі і темні смуги. Як правило, на поверхнях з дрібними нерівностями (рис. 2.5а) виникають вузькі смуги (рис. 2.5б), які можна розглянути тільки під великим збільшенням, тобто за допомогою мікроскопа зі збільшенням 100 разів і більше.

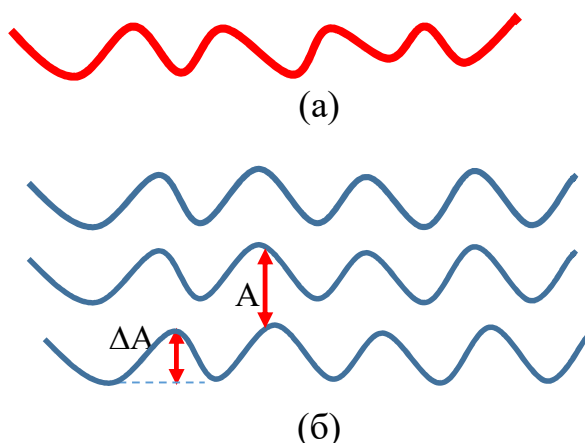
З інтерференційної картини (рис. 2.5б) визначається величина вигину смуги  $\Delta A$  в області проходження досліджуваної подряпини (впадини). Глибина западини  $h$  визначається за формулою [32]:

$$h = \frac{\Delta A \lambda}{A 2}, \quad (2.7)$$

де  $A$  – відстань між смугами,

$\lambda$  – довжина хвилі світла,

$\Delta A$  – відносна похибка



(а) – профіль поверхні, (б) – вигляд інтерференційної картини

Рисунок 2.5 – Вимірювання глибини подряпини (впадини) за вигином інтерференційних смуг [32]

## 2.7 Висновки до розділу 2

1. В якості приладу для шліфування зразків із сталі Ст3 обрано кутову шліфмашину Bosch GWS 850-125, як представника найпоширенішого засобу для обробки металу в побуті, який має гарні технічні характеристики та може здійснювати швидкісне (54 м/с) та високошвидкісне шліфування (67,5 м/с, 80 м/с).

2. В якості шліфувального матеріалу обрані пелюсткові диски діаметром 125 мм форми ППТ 1 з електрокорунду на тканевій основі із зерном Р80, Р100 та Р120.

3. Для дослідження якості відшліфованих поверхонь обрали твердомір ПМТ-3 та інтерферометр МІІІ-3.

4. Для розрахунку температурного поля під час швидкісного шліфування обрали програму Mathcad, як таку, що має вбудовані спеціальні функції, зокрема функції Бесселя.

5. Для обробки зображень, отриманих з мікроскопу, використовували програму Image-Pro Plus, як таку, що є найбільш повним програмним пакетом для професійної обробки і аналізу зображень в наукових дослідженнях.



### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Моделювання температурного поля під час швидкісної обробки поверхні зразків із сталі Ст3

Моделювання температурного поля під час швидкісної обробки поверхні сталі Ст3 здійснювали в програмі Mathcad за формулою (1.4). В якості вихідних даних брали властивості сталі Ст3 з табл. 1.2 та 1.3. Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , взяли рівним 42,5 Вт/(м<sup>2</sup> К), що відповідає середньому значенню на інтервалі температур 100 °С - 700 °С. Ефективну потужність джерела тепла  $q$  розраховували, маючи на увазі, що максимальна потужність кутової шліфмашини є 850 Вт, площа її поверхні обробки становить 50 мм<sup>2</sup>х50 мм<sup>2</sup>. Товщина шару, що знімається (товщина стружки) вимірювалась за допомогою двох послідовних вимірів товщини заготовки штангенциркулем – до шліфування і після нього. Так, для шліфування зі швидкістю 54 м/с за 10 с товщина знятого шару складала 0.13 мм і знятий об'єм -  $V = 50 \cdot 50 \cdot 0.13 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 = 325 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ .

Розрахована ефективна потужність джерела тепла на довжині контакту 5 см дорівнювала:

- для швидкості 54 м/с -  $q = 133.5 \text{ МВт/м}^2$ ;
- для швидкості 67,5 м/с -  $q = 113.0 \text{ МВт/м}^2$ ;
- для швидкості 80 м/с -  $q = 80 \text{ МВт/м}^2$ .

Зменшення ефективної потужності при збільшенні швидкості оброблення спричинене зменшенню контактної площі між поверхнею зразка і шліфувальним колом.

Порівнюючи температурне поле, яке поширюється по товщині зразка сталі Ст3, при різних швидкостях обробки, встановили, що найбільший температурний вплив прогнозується для режиму шліфування на швидкості у 54 м/с, що спричинене більшим часом обробки, порівняно із обробкою на

інших швидкостях та більшою кількістю стружки. Найменший температурний вплив прогнозується для режиму шліфування у 80 м/с.

Як приклад, розраховані за формулою (1.4) температурне поле, рис. 3.1, та температурний градієнт, рис. 3.2, спрямовані перпендикулярно до поверхні, представлені для швидкості 54 м/с.

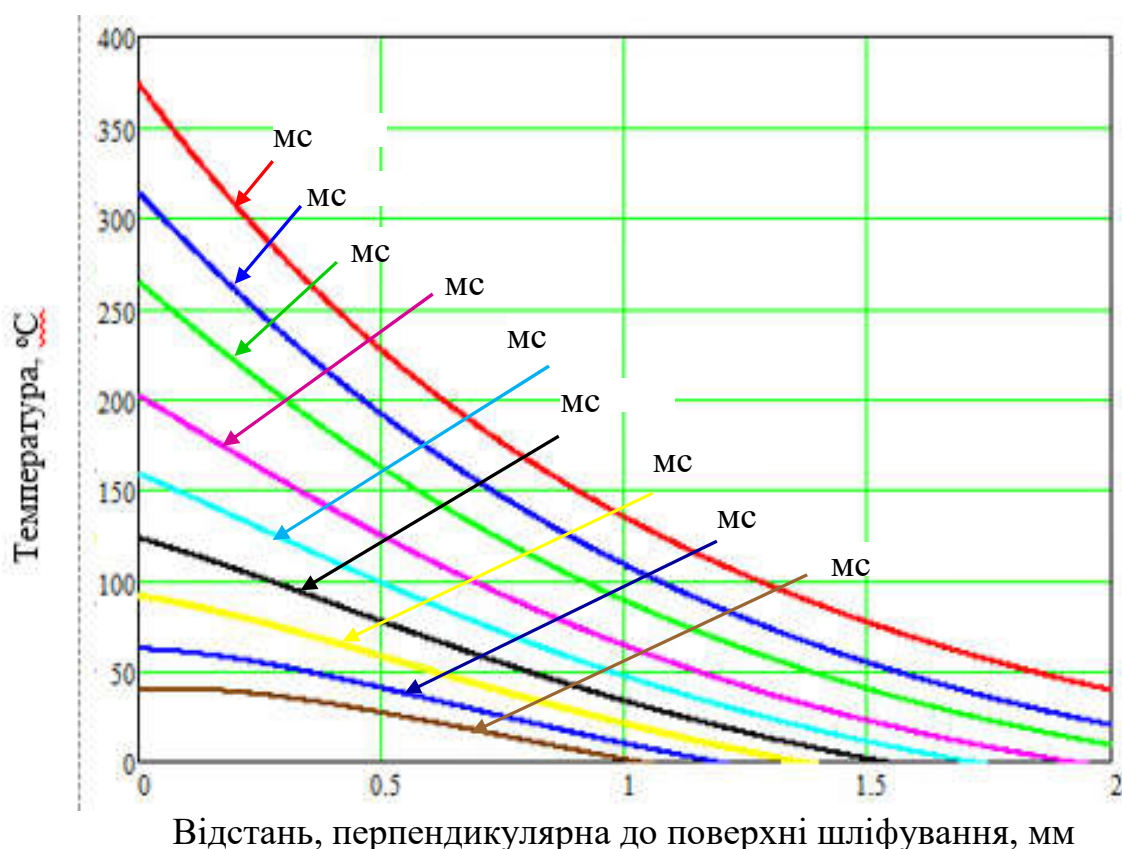
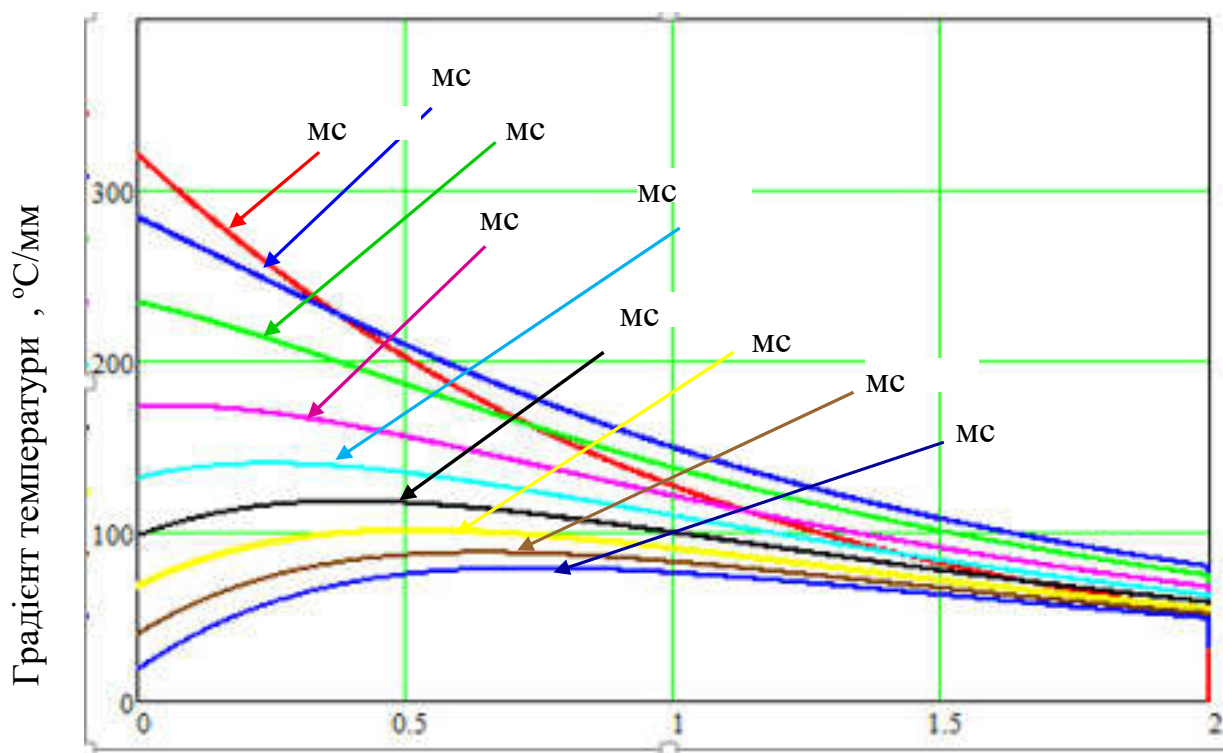


Рисунок 3.1– Зміна температури перпендикулярно до поверхні шліфування зразка Ст3 при швидкості шліфування 54 м/с при різних значеннях часу

Зазначимо, що згідно графіку розподілу (рис. 3.1) температурного поля нагрітої від шліфування поверхні зразків Ст3, максимальна температура на поверхні складає 375 °C і за 2.7 с спадає до 38 °C. Розрахований градієнт температурного поля, рис. 3.2, має порядок  $10^5$ , що може привести до значного розширення зерен в приповерхневому шарі зразка і утворити тріщини.



Відстань, перпендикулярна до поверхні шліфування, мм

Рисунок 3.2– Градієнт температури в напрямку, перпендикулярному до поверхні шліфування зразка Ст3 при швидкості шліфування 54 м/с при різних значеннях часу

### 3.2 Експериментальне визначення температури під час швидкісної обробки поверхні зразків із сталі Ст3

Для виміру температури на поверхні використали інфрачервоний пірометр GM-1650. Остання цифра марки визначається максимально можливою температурою для виміру цим пристроєм. Пірометр міряє радіаційну температуру, тобто весь спектр випромінювання від довжини хвилі 8 мкм до 14 мкм. В цьому випадку можна скористатись законом Стефана-Больцмана (2.2) для випромінювання абсолютно чорного тіла. Оскільки метали є добре відбиваючими електромагнітні хвилі, в цій формулі треба ще враховувати коефіцієнт чорноти тіла. Для його визначення скористались нагрівачем, термопарою та чорною ізоляційною стрічкою, яка має ступінь чорноти одиницю, рис. 3.3. Термопара була підключена до мультиметра UNIT-T M 838 і відразу показувала температуру в гадусах Цельсія.

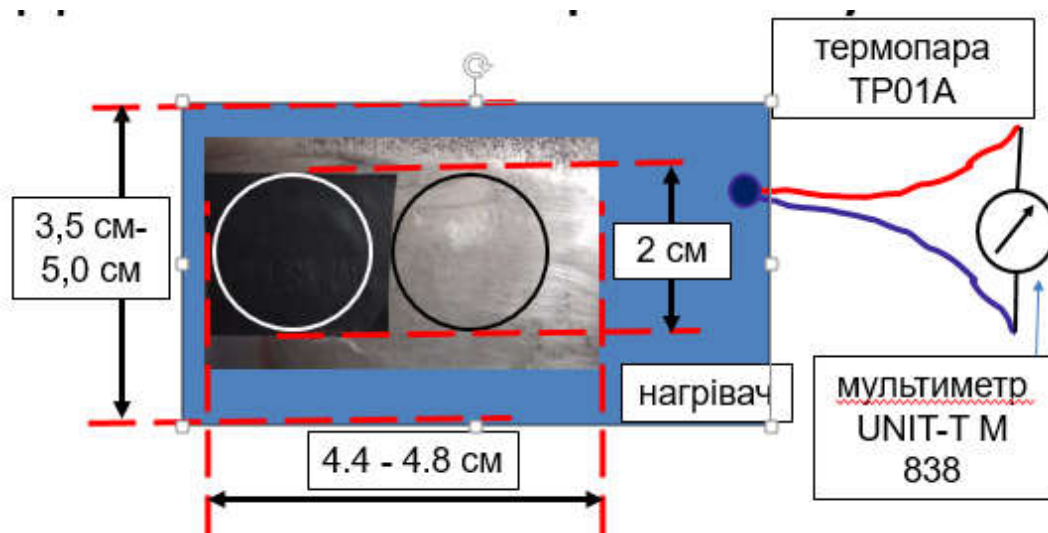


Рисунок 3.3 - Експериментальне обладнання для визначення ступеню чорноти поверхні зразка Ст3

Показання термопари та пірометра на добре відбиваючій та чорній поверхнях зразка сталі Ст3 знімали при нагріванні від 15 °С до 200 °С, таблиця 3.1. Коефіцієнт чорноти поверхні сталі Ст3 –  $a$  – розраховували за формулою 2.4. Визначили середнє значення коефіцієнту чорноти поверхні  $\bar{a}$  за формулою (3.1):

$$\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i, \quad (3.1)$$

де  $a_i$  - коефіцієнт чорноти поверхні сталі Ст3 при температурі  $T_i$ ,

$N$  - кількість вимірювань.

Розраховали абсолютну  $\Delta a_i = a_i - \bar{a}$  та відносну похибки  $\Delta a_i / a = \sqrt{(a_i - \bar{a})^2} / N$ . Результати відобразили в таблиці 3.1.

Розраховані:

- середнє значення коефіцієнту чорноти поверхні  $\bar{a} = 0.224$ ;
- середня абсолютна похибка  $\Delta \bar{a} = \pm 0.0177$ ;
- абсолютна середня похибка  $\Delta \bar{a} / a = 0.0779 = 7.8\%$ .

Таблиця 3.1 – Визначення ступеню чорноти зразків із сталі Ст3 та температури при нагріванні

Температура чорного тіла $T_u$ , °C	Температура сірого тіла $T_s$ , °C	Температура вимірювання термопарою $T_m$ , °C	Температура чорного тіла $T_u$ , K	Температура сірого тіла $T_s$ , K	Ступінь чорноти $a$	Абсолютна похибка $\Delta a$	Відносна похибка $\Delta a/a$
15	13	15	288	280			
20	19	20	293	292	0,22	-0,0041	0,018
32	22	30	305	295	0,235	0,01122	0,05
65	28	60	338	301	0,166	- 0,05722	0,256
80	37	80	353	310	0,241	0,01698	0,076
100	45	100	373	318	0,246	0,02272	0,102
120	49	120	393	322	0,211	- 0,01241	0,056
140	58	140	413	331	0,218	-0,0057	0,025
160	72	160	433	345	0,248	0,02451	0,11
180	78	180	453	351	0,228	0,004	0,018

Отримані дані таблиці 3.1 використовували для визначення температури зразка від сірої поверхні  $T_{icm}$  під час шліфування за формулою (2.4), враховуючи, що коефіцієнт сірої поверхні в пристрої встановлений виробником пірометра GM-1650 на рівні 0.95:

$$T_{icm} = \frac{1}{0.95} \left( \frac{T_1^4 - [1 - \bar{a}]T_2^4}{\bar{a}} \right)^{1/4}, \quad (3.2)$$

де  $\bar{a}$  - середнє значення коефіцієнту чорноти поверхні,

$T_1$  - температура, що показує пірометр підчас шліфування поверхні,

$T_2$  - температура оточуючого середовища.

Згідно формули (3.2) похибку виміру температури знайдемо, взявши логарифм натуральний від  $T_{icm}$ :

$$\ln(T_{icm}) = \frac{1}{4} \left[ \ln(T_1^4 - [1-a]T_2^4) - \ln(0.95a) \right]. \quad (3.3)$$

Похідна від  $\ln(T_{icm})$  дасть відносну похибку виміру температури  $\delta T_{icm}$  пірометром  $T_{icm}$ :

$$\delta T_{icm} = \frac{\Delta T_{icm}}{T_{icm}} = \left| \frac{1}{4} \frac{T_2^4 \cdot \Delta \bar{a}}{T_1^4 - [1-\bar{a}]T_2^4} - \frac{\Delta \bar{a}}{\bar{a}} \right| \quad (3.4)$$

Експериментально визначені температура зразка  $T_{icm}$ , відносна похибка виміру температури  $\delta T_{icm}$  та час  $t_{np}$  виникнення припіків для швидкостей шліфування 54 м/с, 67.5 м/с та 80 м/с зерном Р80 записані в таблиці 3.2. Під час проведення експерименту температура в кімнаті для шліфування зерном Р80 становила 13 °С, для інших експериментів – 15 °С.

Розраховані значення температури більше, ніж в 3 рази перевищують експериментальні тому, що визначають контактну температуру, а виміряти пірометром можливо температуру на площі, що відповідає роздільній здатності пірометру (для GM-1650 це 50:1).

Таблиця 3.2 – Визначення часу  $t$  та температури  $T_{icm}$  виникнення припіків для шліфування кругом із зерном Р80 при різних швидкостях

Швидкість $V$ , м/с	54	67,5	80
Час $t$ , с	22	18	26
Температура пірометра $T_{пиром}$ , °С	43	45	42
Температура істина $T_{icm}$ , °С	129	135	127
Відносна похибка $\delta T_{icm}$ , %	7,7	7,8	7,8

Експериментально визначені температура зразка  $T_{icm}$ , відносна похибка виміру температури  $\delta T_{icm}$  та час  $t_{np}$  виникнення припиків для швидкостей шліфування 54 м/с, 67.5 м/с та 80 м/с зерном Р100 – в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Визначення часу  $t$  та температури  $T_{icm}$  виникнення припиків для шліфування кругом із зерном Р100 при різних швидкостях  $v$

Швидкість $v$ , м/с	54	67,5	80
Час $t$ , с	28	26	33
Температура пірометра $T_{пиром}$ , °С	41	43	37
Температура істина $T_{icm}$ , °С	121	126	112
Відносна похибка $\delta T_{icm}$ , %	7,7	7,7	7,7

Експериментально визначені температура зразка  $T_{icm}$ , відносна похибка виміру температури  $\delta T_{icm}$  та час  $t_{np}$  виникнення припиків для швидкостей шліфування 54 м/с, 67.5 м/с та 80 м/с зерном Р120 – в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Визначення часу  $t$  та температури  $T_{icm}$  виникнення припиків для шліфування кругом із зерном Р120 при різних швидкостях  $v$

Швидкість $v$ , м/с	54	67,5	80
Час $t$ , с	35	32	39
Температура пірометра $T_{пиром}$ , °С	37	40	34
Температура істина $T_{icm}$ , °С	109	118	100
Відносна похибка $\delta T_{icm}$ , %	7,7	7,7	7,7

Для наочності, дані таблиць 3.2 - 3.4 представлені на графіку експериментальної залежності часу виникнення припиків від швидкості шліфування поверхні зразка Ст3, рисунку 3.4 та графіку експериментальної залежності середньої температури від швидкості шліфування поверхні зразка

Ст3 для кругів із зернами P80, P100 та P120. Точки експериментальних даних поєднані пунктиром, так як 3-х значень швидкості шліфування недостатньо для виявлення типу залежностей.

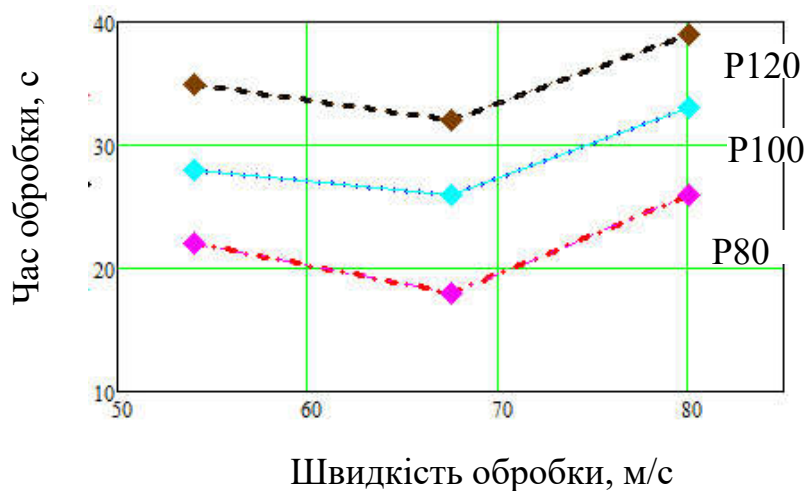


Рисунок 3.4 – Експериментальна залежність часу виникнення припиків від швидкості шліфування поверхні зразка Ст3

На рисунку 3.5 зображена експериментальна залежність середньої температури від швидкості шліфування поверхні зразка Ст3 для кругів із зернами P80, P100 та P120.

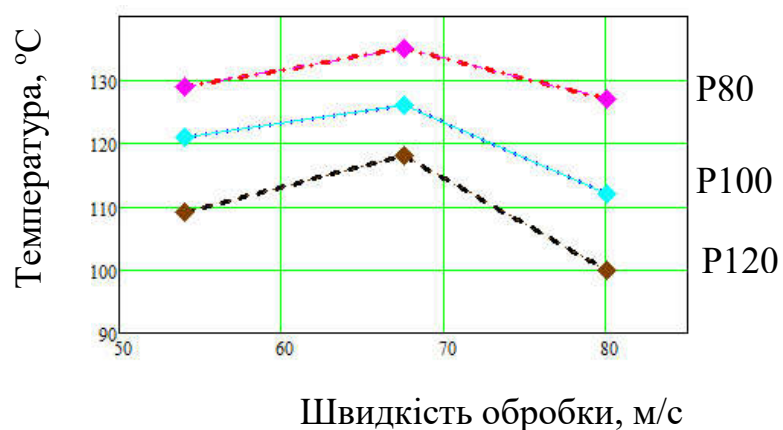


Рисунок 3.5 – Експериментальна залежність середньої температури від швидкості шліфування

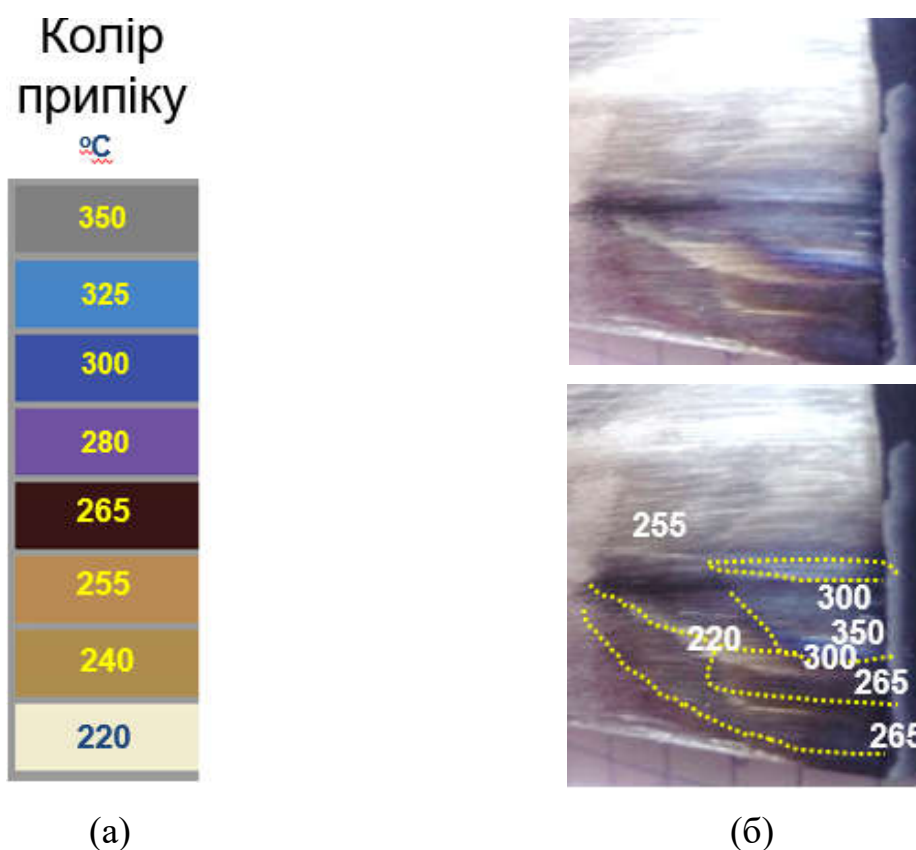


На графіках можна спостерігати наступні тенденції:

1) найменший час виникнення припиків та найбільша середня температура спостерігаються для шліфування зерном Р80 при швидкості обробки 67,5 м/с;

2) найбільший час виникнення припиків та найменша середня температура спостерігаються для шліфування зерном Р120 при швидкості обробки 80 м/с.

Експериментально визначити розподіл температури по поверхні можна за кольором оксидної плівки, [33], рис. 3.6.



(а) - колір оксидної плівки (припикіу) в [32], (б) – дві однакові поверхні зразка після

Рисунок 3.6 – Розподіл температури (пунктирна лінія) в °C при шліфуванні

На рисунку 3.4 (б) два рази зображена поверхня після 26 с шліфування кругом із зерном Р80 на швидкості 80 м/с - без і з нанесеними ізотермічними

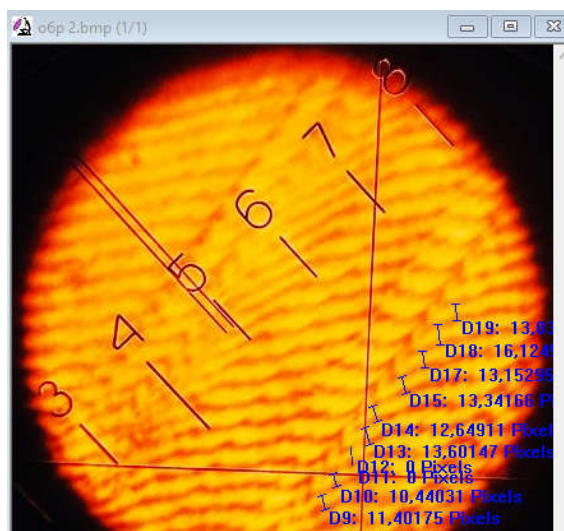
пунктирними лініями і розподілом температури за кольором (білі цифри відповідають температурі у Цельсіях).

### 3.3 Визначення глибини западин та кількості рисок на одиницю площі поверхні сталі Ст3 після обробки кутовою шліф машиною

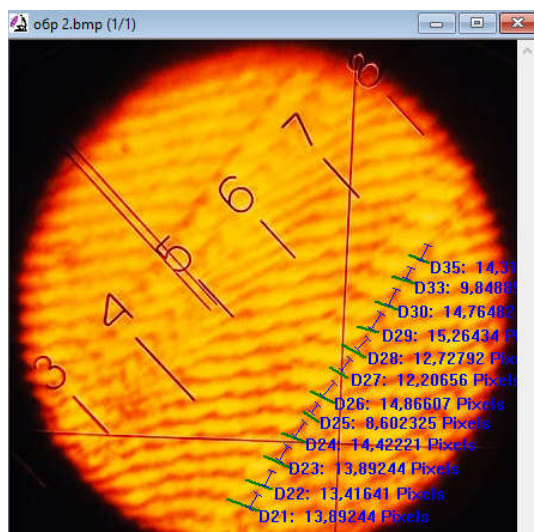
Визначимо залежність глибини западин, що формуються при шліфуванні, на середню та контактну температури. Висоту западин відшліфованої поверхні визначили згідно формули (2.7) для довжини світла жовтого кольору  $\lambda = 0.55$  мкм.

Оскільки однаковий час шліфування для різних швидкостей круга із різними зернами припадає на 15 с, то визначимо спочатку тенденцію до зміни глибини западин із одним зерном при різних швидкостях шліфування.

В якості прикладу, розглянемо поверхні, отримані для шліфування кругом із зерном Р100 для різних швидкостей шліфування  $v = 54$  м/с, 67.5 м/с, 80 м/с відшліфованих за 15 с. Інтерференційні картини з поверхонь отримували на інтерферометрі МІІІ-3, фотографували їх і для визначення  $\Delta A$  - висоти викривлень інтерференційної лінії, та  $A$  - відстані між інтерференційними лініями – завантажували у програму Image Pro Plus. Оскільки виміряні величини  $\Delta A$  та  $A$  стоять в чисельнику та знаменнику формули (2.7), то їх значення можна залишити в пікселях. Зображення інтерференційних ліній з нанесеними значеннями пікселів представлені на рисунку 3.7 – для швидкості 54 м/с, на рис.3.8 – для швидкості 67.5 м/с, на рисунку 3.9 – для швидкості 80 м/с. Виміряні значення  $\Delta A$  та  $A$  занесли в таблиці. В кожній з таблиць розрахували глибину западин  $h$ , середнє значення глибини западин  $\bar{h}$ , абсолютну відносну похибку виміру глибини западин  $\Delta h = h - \bar{h}$  та відповідно  $\delta h = \Delta h / \bar{h}$  та середні значення абсолютної  $\Delta \bar{h}$  та відносної похибок  $\delta \bar{h}$ .



a)



(б)

(а) – визначення  $A$  - висоти відстані між інтерференційними лініями,

(б) – визначення  $\Delta A$  - висоти викривлень інтерференційної лінії

Рисунок 3.7 – Інтерференційні ліній з нанесеними значеннями пікселів для поверхні зразка зі сталі Ст3 при шліфуванні кругом із зерном P100 за 15 с зі швидкістю 54 м/с

Зображення інтерференційних ліній з нанесеними значеннями пікселів представлені на рис. 3.8 – для швидкості 67,5 м/с. На рисунок нанесені значення пікселів для висоти відстані між інтерференційними лініями і висоти викривлень інтерференційної лінії.

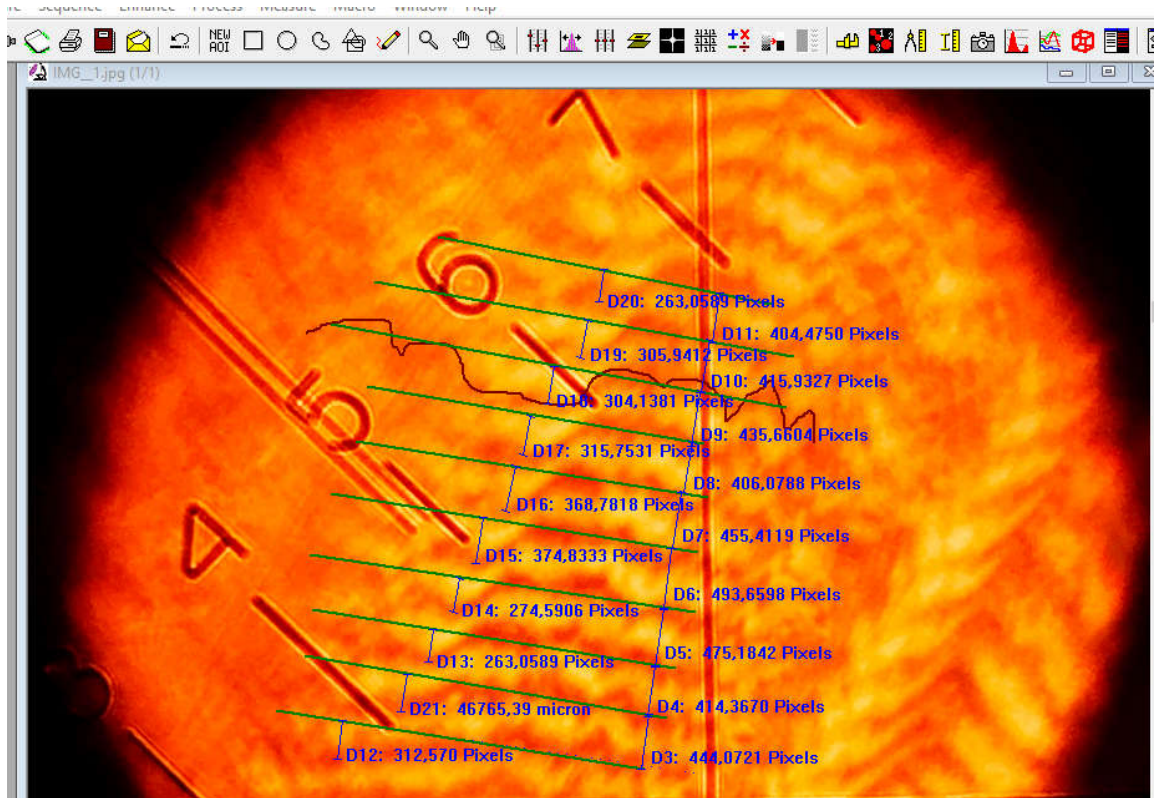
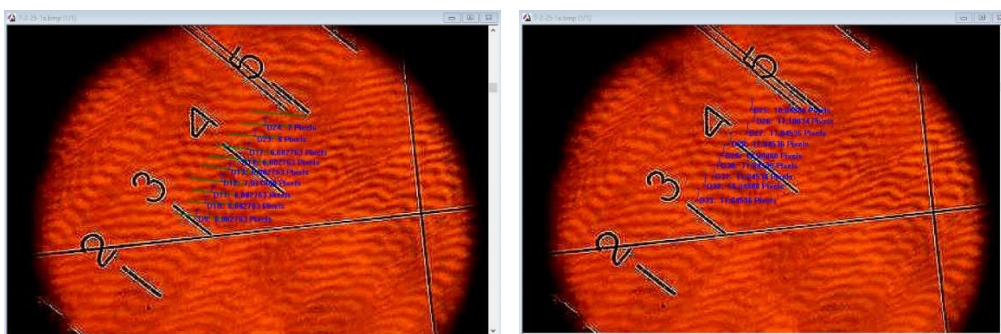


Рисунок 3.8 – Інтерференційні ліній для поверхні зразка зі сталі Ст3 при шліфуванні кругом із зерном Р100 за 15 с зі швидкістю 67.5 м/с

Зображення інтерференційних ліній з нанесеними значеннями пікселів представлені на рис.3.9 – для швидкості 80 м/с.



(а)

(б)

(а) – визначення  $A$  - висоти відстані між інтерференційними лініями;

(б) – визначення  $\Delta A$  - висоти викривлень інтерференційної лінії

Рисунок 3.9 – Інтерференційні ліній з нанесеними значеннями пікселів для поверхні зразка зі сталі Ст3 при шліфуванні

В таблиці 3.5 наведені визначення висоти западин  $h$  для шліфування кругом із зерном Р100 на протязі 15 с зі швидкістю  $v = 54$  м/с.

Таблиця 3.5 – Визначення висоти западин  $h$

висоти викривлень інтерференційної лінії $\Delta A$ , pixels	13.89	14.87	12.21	12.73	15.26	14.76
висоти відстані між інтерференційними лініями $A$ , pixels	11.4	12.65	13.34	13.15	16.12	13.03
Глибина западин $h$ , мкм	0.335	0.325	0.252	0.267	0.259	0.312
Абсолютна похибка $\Delta h$ , мкм	0.043	0.033	-0.04	-0.024	-0.033	0.021
Відносна похибка $\delta h$ , %	14.9	11.3	13.7	8.4	11.2	7.1

В таблиці 3.6 наведені визначення висоти западин  $h$  для шліфування кругом із зерном Р100 на протязі 15 с зі швидкістю  $v = 67.5$  м/с.

Таблиця 3.6 – Визначення висоти западин

висоти викривлень інтерференційної лінії $\Delta A$ , pixels	263	306	304	316	367	375	275	263	312
висоти відстані між інтерференційними лініями $A$ , pixels	405	416	437	406	45	494	415	414	444
Глибина западин $h$ , мкм	0.1736	0.2023	0.1913	0.2140	0.2218	0.2088	0.1822	0.1747	0.1932
Абсолютна похибка $\Delta h$ , мкм	-0.018	0.006	-0.005	0.018	0.026	0.012	-0.014	-0.022	-0.003
Відносна похибка $\delta h$ , %	9.04	3.03	2.56	9.02	13.0	6.33	7.18	11.01	1.57

В таблиці 3.7 наведені визначення висоти западин  $h$  для шліфування кругом із зерном Р120 на протязі 15 с зі швидкістю  $v = 80$  м/с.

Таблиця 3.7 – Визначення висоти западин

висоти викривлень інтерференційної лінії $\Delta A$ , pixels	6.00	6.09	6.08	6.08	6.00	7.07	6.08	6.08	6.08
висоти відстані між інтерференційними лініями $A$ , pixels	11.05	10.05	11.05	11.05	11.05	11.05	11.05	11.18	10.05
Глибина западин $h$ , мкм	0.150	0.167	0.151	0.151	0.149	0.176	0.151	0.150	0.166
Абсолютна похибка $\Delta h$ , мкм	-0.080	0.010	-0.006	-0.06	-0.08	0.019	-0.06	-0.07	0.010
Відносна похибка $\delta h$ , %	4.8	6.3	3.5	3.5	4.8	12.2	3.5	4.6	6.1

В таблиці 3.8 наведені визначення середнього значення глибини западин  $\bar{h}$  та середніх значень абсолютної  $\Delta \bar{h}$  та відносної похибок  $\delta \bar{h}$  виміру западин  $h$  для шліфування кругом із зерном Р100 з різними швидкостями обертів  $v$  на протязі 15 с.

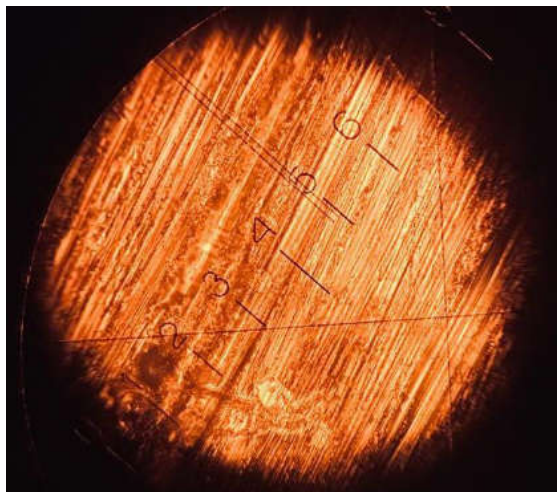
Таблиця 3.8 – Визначення середнього значення глибини западин  $\bar{h}$ , середніх значень абсолютної  $\Delta \bar{h}$  та відносної похибок  $\delta \bar{h}$  виміру западин

Дані з табл.	Швидкість $v$ , м/с	Глибина западин $\bar{h}$ , мкм	Абсолютна похибка $\Delta \bar{h}$ , мкм	Відносна похибка $\delta \bar{h}$ , %
Табл. 3.5	54	0.292	0.032	11
Табл. 3.6	67.5	0.196	0.014	7
Табл. 3.7	80	0.157	0.009	6

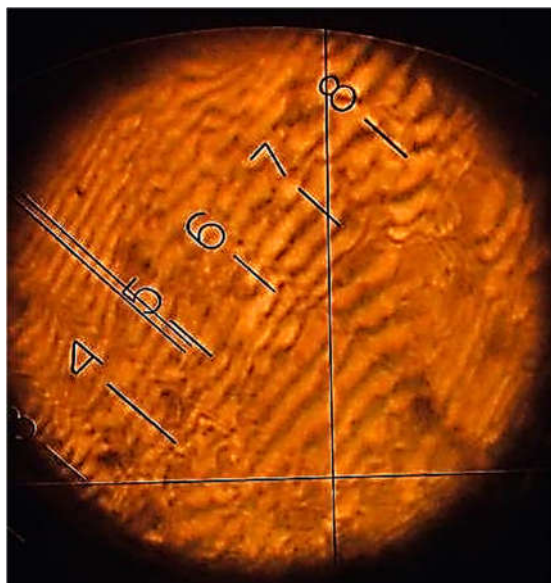
Як витікає з таблиці 3.8 – із збільшенням швидкості обертів шліфувального круга зменшується висота западин, їх середня та абсолютна похибки вимірювання. У [34] це пояснюється тим, що при збільшенні швидкості обертання кола в зніманні металу бере участь більша кількість ріжучих зерен, в результаті чого зменшується перетин стружки, що знімається зерном, а значить і зменшується величина поглиблення зерна в метал.



Нажаль, порівнювати глибину западин для різних швидкостей обробки, при яких спостерігались припіки – не можливо. т.к. по-перше - часи обробки різні, по-друге – поверхня має сліди плівок окислів (припіки), які псують інтерференційну картину (рис. 3.10).



а)



(б)

(а) – поверхня, (б) – інтерференційні лінії

Рисунок 3.10 – Фотографія поверхні та інтерференційних ліній для поверхні зразка зі сталі Ст3 при шліфуванні

### 3.4 Визначення твердості поверхні

Для того, щоб з'ясувати, чи погіршилась твердість поверхні зразка при шліфуванні з великими швидкостями, був проведений дюрOMETричний аналіз. Як приклад, на рисунку 3.11 наведений зразок, відшліфований на швидкості 80 м/с кругом з зернистістю Р100 з відбитками алмазної пірамідки, яку вдавлювали вагою в 50 г на приладі ПМТ-3.

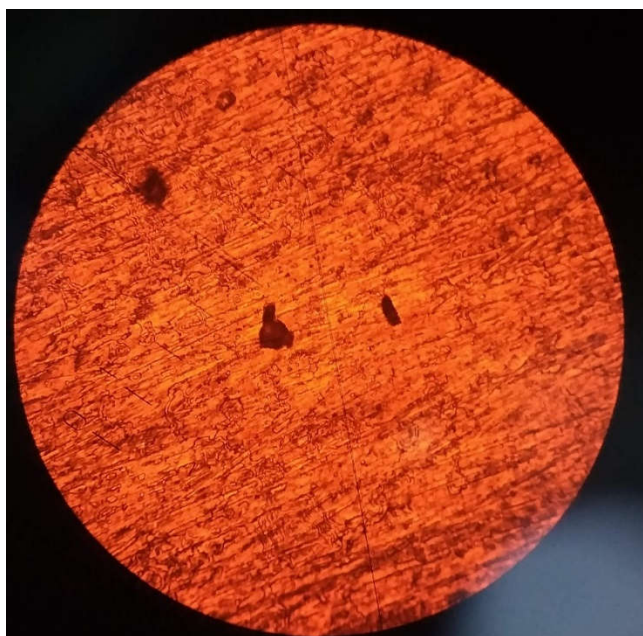


Рисунок 3.11 – Відбитки мікротвердості на поверхні зразка сталі Ст3

З рисунку. 3.11 бачимо, що відбитки не є чіткими. Визначені значення мікротвердості приладом ПМТ-3 з-за великого зерна шліфувального круга мають великий розбіг, табл. 3.12. Але порівняно з повільно відшліфованою поверхнею (середнє значення мікротвердості  $\bar{H}_0 = 2,2 \pm 0,05$  ГПа), твердість з збільшенням часу шліфування спочатку зростає, а при продовженні швидкісного шліфування – спадає. Припускаємо, що зростання спричинене невеликим наклепом, який можна бачити на рис. 3.10. При подальшому продовженні шліфування твердість зменшується при руйнуванні шару наклепу та виникненні припиків. Як приклад, в таблиці 3.11 наведені значення мікротвердості ( $H$ ) та її значення абсолютної ( $\Delta H$ ) та відносної похибок



( $\delta\bar{H}$ ) для шліфування кругом із зерном Р120 зі швидкістю обертів 67,5 м/с в залежності від часу шліфування.

Таблиця 3.11 – Значення мікротвердості  $H$ , її значень абсолютної -  $\Delta H$  та відносної похибок -  $\delta\bar{H}$

$t, \text{с}$	15			26			28			33		
Мікротвердість $H$ , ГПа	3.9	2.5	2.9	2.8	2.9	3.4	2.7	2.5	2.9	2.5	2.4	2.4
Мікротвердість $\bar{H}$ , ГПа	3.1			3.0			2.7			2.43		
Абсолютна похибка $\Delta H$ , ГПа	0.8	-0.6	0.2	-0.2	-0.1	0.4	0	-0.2	0.2	0.03	0.07	0.03
Абсолютна похибка $\Delta\bar{H}$ , ГПа	0.53			0.25			0.13			0.04		
Відносна похибка $\delta H$ , %	25.8	19.4	6.5	7.7	4.4	12.1	0	7.4	7.4	1.4	2.7	1.4
Відносна похибка $\delta\bar{H}$ , %	17.2			8.1			4.9			1.8		

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Теоретична побудова розподілу температурного поля за товщиною зразка із Ст3 при різних значеннях шліфування кругом із зерном Р60 показала, що припік може спостерігатись при швидкості шліфування 54 м/с, що й спостерігалось в проведених експериментах.

2. Градієнти температури, які розраховані теоретично, свідчать про неможливість утворення тріщин на поверхні для всіх трьох швидкостей 54 м/с, 67.5 м/с та 80 м/с, що при використаному збільшенні (до  $\times 100$ ) для дослідження мікроструктури зразків зі сталі Ст3 не було виявлено.

3. Дослідження мікротвердості за товщиною відшліфованих зразків показало, що зміна мікротвердості, порівняно з початковим станом, відбулась тільки при шліфуванні зі швидкістю 80 м/с.

4. Дослідження глибини западин поверхні зразків зі сталі Ст3 показало, що їх величина зменшується зі збільшенням швидкості обробки та збільшенням кількості зерен шліфувальних кругів.

5. При шліфуванні поверхні кутовою шліфмашиною з урахуванням зазначеного вище рекомендовано: використовувати швидкість обробки 80 м/с для кругів КПП з Р120.

## 4 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (з появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Метою розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередній частині магістерської дисертації у вигляді розроблення концепції стартап-проекту в умовах висококонкурентної ринкової економіки глобалізаційних процесів.

### 4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Ідея даного проекту полягає у розробці інструкцій щодо шліфування зразків сталі Ст3 кутовою шліфувальною машинкою з метою уникнення припиків та отримання максимально якісної поверхні.

Проведення повної оцінки ринкової спроможності наразі неможлива, оскільки дослідження впливу умов механічної обробки кутовою шліфувальною машинкою на стан поверхні металу досі триває.

В таблиці 4.1 Наведений опис ідеї стартап-проекту

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Вибір оптимальних умов шліфування зразка сталі Ст3	Машинобудування	Підвищення припрацьовуваності деталей механізму
	Металообробка	

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту наведено в таблиці 4.2. Порівняння проводилось кінцевого продукту, обробленого шпинделя.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних (S), слабких (W) та нейтральних (N) характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	Товари/концепції конкурентів		
		Мій проект	Конкурент1 (Сталкон)	Конкурент2 (TISO)
1	Вартість сировини	Сильна (S)	Низька (W)	Низька (W)
2	Викиди	Середня (N)	Середня (N)	Середня (N)
3	Мікротвердість	Низька (W)	Середня (N)	Середня (N)

З таблиці 4.2 видно, що даний проект має низьку собівартість та, при дотриманні умов, доволі екологічний.

З таблиці 4.3 можна зробити висновок, що ідею проекту можна реалізувати на виробництві маючи необхідне обладнання.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технології	Доступність технології
Підбір параметрів	Шліфування кутовою шліфмашинкою	Технологія існує	Доступна

В таблиці 4.4 наведені характеристика потенційних клієнтів стартап проекту.

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту.

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Висока припрацьованість деталей	Юніверсал моторз груп	Забезпечення високої припрацьованості деталей	Легкість та швидкість обробки

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.5)

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Нестабільність політично-економічної ситуації	Зменшення обсягів виробництва та продажів шліф матеріалів	Пошук шляхів зниження собівартості продукту

В таблиці 4.6 наведені сильні та слабкі сторони даного стартап-проекту

Таблиця 4.6 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Здатність збільшити якість вузлів тертя в механізмах та підвищити швидкість припрацювання деталей	Складність підтримки оптимальних умов механічної обробки поверхні деталі
<p>Можливості:</p> <p>На зовнішньому та внутрішньому ринку присутня досить велика кількість виробників механічного обладнання з якими можна співпрацювати.</p>	Необхідність високої кваліфікації персоналу

#### 4.2 Висновки до розділу 4

Аналіз ринкової спроможності стартап-проекту «Розробка інструкцій щодо шліфування зразків сталі Ст3 кутовою шліфувальною машинкою», засвідчив, що застосування даної технології для обробки будь-яких деталей виготовлених зі сталі Ст3 є дуже перспективним.

Визначено, що можливість впровадження даної технології, опираючись на огляд потенційних груп клієнтів, незначна. Однак позитивним моментом є те, що головні конкуренти є потенційними клієнтами, що значно підвищує імовірність співпраці з компаніями.

## **5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Мета даного розділу – аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що можуть призвести до ураження організму та умов, які спричиняють травмування під час шліфування кутовою машинкою сталі Ст3.

### **5.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві**

Служба охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського (в якому була проведена робота) підпорядковується ректору М.З. Згуровському. Посаду начальника відділу охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського займає Е.Г. Луцик. Відповідальною особою, що гарантує дотримання вимог охорони праці на інженерно-фізичному факультеті є П.І. Лобода, на кафедрі фізики металів (5 поверх навчального корпусу № 9) – Є.В. Іващенко.

### **5.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів**

В даному розділі було виконано аналіз шкідливих факторів, а саме:

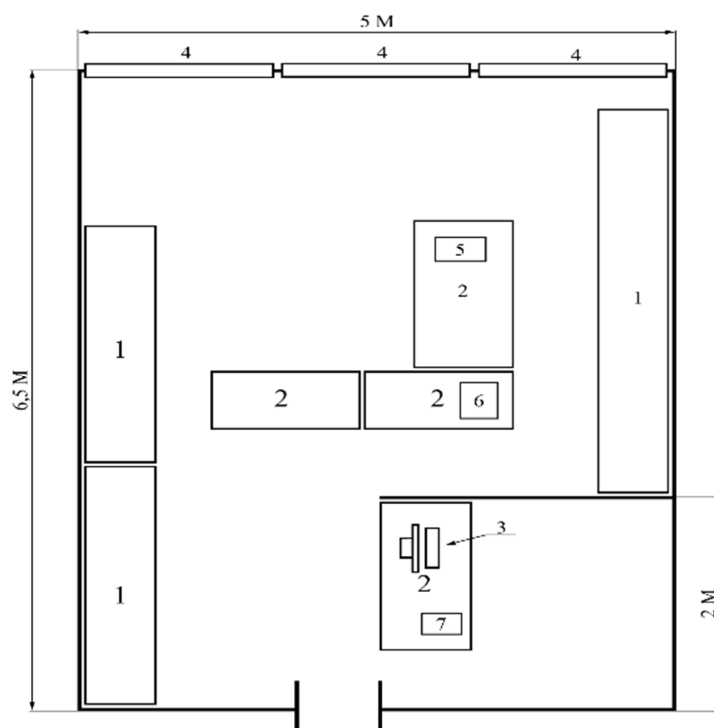
- Мікроклімат;
- Освітленість;
- Шум;
- Електробезпека;
- Запиленість та загазованість.

#### **5.2.1 Мікроклімат**

Чистота повітря його хімічний склад, оптимальність температури, вологість та його (повітря) швидкість руху має суттєве значення для нормальної працездатності людини. Саме тому важливим є аналіз мікроклімату у лабораторіях в котрих здійснювалось дослідження. Зазначені параметри (температури, рухливості повітря у робочій зоні та

вологості повітря) є характеристиками придатності умов для роботи дослідників, відповідно до встановлених норм [40], з якими і необхідно співвіднести отримані дані.

Магістерська дисертація виконана в лабораторії № 034, 0 (нульового) поверху, навчального корпусу № 9 кафедри фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Схематичне зображення лабораторії із розташуванням всіх її елементів представлено на рисунку 5.1.



1 – шафа; 2 – стіл; 3 – обчислювальна техніка; 4 – вікна; 5 –ПМТ-3М;  
6 – Элитрон – 26А»; 7 – МІМ-8М

Рисунок 5.1 – Схема лабораторного приміщення в якому виконувалась магістерська дисертація

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, категорія робіт І<sub>б</sub> легка (роботи, які виконуються сидячі, стоячи або пов'язані з ходінням та супроводжуються деякими фізичними напруженнями) за такої категорії робіт енерговитрати складають до 150 Ккал/год [41].

Оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови наведені у



таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови

Період року	Категорія робіт	Температура		Відносна вологість, %		Швидкість руху пов., м/с	
		Опт.	Доп.	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.
Холодний	16	21-23	20-24	60-40	<75	0,1	0,1-0,3
Теплий		22-24	21-28	60-40	<65	0,2	0,1-0,3

За результатами дослідження виявлено, що у робочій зоні лабораторії №034 та №036 фактична температура у холодний період року становить +5 °С, фактична швидкість руху повітря – 0,1 м/с та фактична відносна вологість 70 %. В теплий період року фактична температура становить +15 °С, фактична швидкість руху повітря – 0,2 м/с та фактична відносна вологість – 55 %.

На основі написаного робимо висновок, що мікроклімат в лабораторіях не відповідає наведеним у таблиці 5.1 оптимальним умовам.

### 5.2.2 Освітленість

Правильно підібране освітлення, відповідно до норм [42], надає сприятливі умови для організації робочого процесу. Освітлення поділяють на три типи: природне, штучне та суміщене. В свою чергу природне освітлення поділяють на бічне, верхнє та комбіноване, а штучне на – загальне та місцеве.

Невірно підібране освітлення, його нерівномірність, недостатність або надмірність у полі зору працівника наносить шкоду здоров'ю, призводить до зниження продуктивності та розсіювання уваги, що в свою чергу веде до підвищення ризику нещасних випадків.

У лабораторії № 034 здійснюється природне бокове освітлення, вікна

виходять на північ, та штучне освітлення такий тип освітлення носить назву комбінований. Зовнішнє освітлення при хмарній погоді складає 1000 лк. Відстань від вікна до робочого місця не перевищує 3 м.

Для місцевого штучного освітлення використовують лампи розжарювання, для загального – люмінесцентні ЛБ-40 (24 одиниці на кожну з лабораторій) [43].

Завдяки перерахованим заходам освітлення у лабораторіях відповідає вимогам ДБН В.2.5-28-2006.

### **5.2.3 Шум**

Магістерська дисертація виконувалась на установці «Елитрон - 26», що видає певний шум під час роботи, також шум надходив у процесі дослідження зразків на зносостійкість.

Шум може викликати різні загально біологічні подразнення, патологічні зміни, функціональні розлади та механічні ушкодження. Під час роботи в шумних умовах продуктивність ручної роботи може знизитись на 40 %, а при розрахунках на 50 % [41]. При тривалій роботі в шумних умовах перш за все уражається нервова та серцево-судинна системи та органи дихання.

Граничні величини шуму на робочих місцях регламентуються ГОСТ 12.1.003-86. У ньому закладено принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів ДСН 3.3.6.037-99 [42].

У даному випадку наявний імпульсний шум. оскільки робота на установках, які викликають шум, проводилась рідко, тому для захисту від шуму використовували засоби індивідуального захисту протишумові вкладиші, які встромляються у слухові проходи.

### **5.2.4 Електробезпека**

Відповідно до діючих правил побудови електроустановок ПУЕ-2017 з

точки зору небезпеки враження людини електричним струмом приміщення лабораторії відноситься до приміщення без підвищеної небезпеки електротравм. Це приміщення з струмо-непровідною підлогою та з температурою повітря  $18^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$ . При виконанні магістерської дипломної роботи використані електроустановки живляться від мережі з напругою 220 В та частотою змінного струму 50 Гц. До причин враження електричним струмом під час виконання роботи з використанням електрообладнання належать:

- 1) помилкове включення електричних приладів при проведенні ремонтних робіт;
- 2) пошкодження ізоляції неструмопровідних частин електроприладів;
- 3) через відсутність засобів захисту струмопровідних частин.

Безвідповідальне ставлення до електробезпеки має небезпечні наслідки не тільки для здоров'я, а й для життя людини. Імовірність смертельного враження струмом вище, в порівнянні з іншими причинами травматизму [43].

На дію електричної поразки впливає ряд факторів:

- 1) величина струму (1 мА);
- 2) рід струму (струм перемінний);
- 3) частота струму ( 50 Гц);
- 4) шлях струму в організмі (г-н, р-р, р-г);
- 5) тривалість дії струму;
- 6) стан організму.

Виробниче середовище, відноситься до приміщень без підвищеної електричної небезпеки.

Величина струму, що протікає через яку-небудь ділянку тіла. При розробці захисних заходів, вважають небезпечним струм у 25 мА, при якому важко самотійно відірватись від провідника, а струм величиною 100 мА може призвести до смертельного результату.

До напруги 42 В найбільш небезпечний перемінний струм, а більше

42 В вплив однаковий як постійного так і перемінного струму.

Найбільш небезпечна частота в 50 Гц...60 Гц.

У лабораторіях, де проводилось дослідження, виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Завдяки розташуванню робочих місць виключається можливість дотику до корпусів, електроустаткування і приладів

### 5.2.5 Запиленість та загазованість

В процесі приготування шліфів на механічному верстаті утворюється неорганічний пил з сполукою кремнію та окисел хрому  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при поліруванні пастою “ДОІ” у мокрому середовищі. ГОСТ 12.1.005-88 передбачає гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин в повітрі робочої зони: пил з діоксидом кремнію до 4% – ГДК =  $4 \text{ мг/м}^3$ , клас 3; для окису хрому ГДК =  $1 \text{ мг/м}^3$ , клас 2. В таблицю 5.2 [38] занесені виміряні та допустимі значення концентрації речовин, що виділяються при приготуванні шліфів.

Таблиця 5.2 – Концентрація речовин при приготуванні шліфів

Речовина	Концентрація речовини, $\text{мг/м}^3$	
	Виміряна	Допустима за нормами (ГДК)
Пил з діоксидом кремнію до 4 %	8	4
Окис хрому	0,25	1
Етанол	800	1000
Азотна кислота	3	5

Процес приготування шліфів завершується їх травленням. В цій процедурі застосовуються: спирт етанол для обезжирювання та 3 % процентний розчин азотної кислоти в спирті для травлення.

З таблиці 5.2 видно, що фактичні значення концентрації речовини для пилу з діоксидом кремнію до 4 % та окислу хрому перевищують гранично

допустимі концентрації. Враховуючи коротку тривалість шліфування та поліровки, для забезпечення безпечної роботи достатньо використовувати засоби індивідуального захисту – ШБ1 «Лепесток 5». Для травників допустимі норми не перевищуються, тому ніяких засобів захисту використовувати не потрібно.

### 5.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

Для забезпечення безпеки праці були знайдені інженерні рішення щодо пожежної безпеки та проведено розрахунок вентиляції.

#### 5.3.1 Розрахунок вентиляції

Розрахунок об'єму повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією  $L_m$ , визначають, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування. У цьому випадку [1м]:

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0 \quad (3.1)$$

де  $F_0$  – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача,  $m^2$ ;

$V_0$  – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі,  $m/s$ .

Площу  $F_0$  визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою [1м].

Значення  $V_0$  розраховується на підставі забезпечення заданої швидкості повітря  $V_x$  ( $0,5 m/s$ ) у зоні обробки на відстані  $x$  (в метрах) від центра всмоктуючого отвору [1м]:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (x/d)^2 \quad (3.2)$$

де  $d$  – діаметр отвору.

На рисунку 5.2 наведено принципову схему місцевої вентиляції необхідної для проведення електроіскрового легування.



Рисунок 5.2 – Схема місцевої вентиляції

У результаті розрахунків встановлено, що швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі  $V_0$  має становити 22 м/с, а об'єм повітря, що повинно бути видалене місцевою вентиляцією  $L_m - 3392 \text{ м}^3$ .

### 5.3.2 Пожежна безпека

Категорія пожежної небезпеки приміщення (будівлі, споруди) - це класифікаційна характеристика пожежної небезпеки об'єкта, що визначається кількістю і пожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, які знаходяться (обертаються) в них з урахуванням особливостей технологічних процесів, розміщених в них виробництв [42].

Відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою» [40] лабораторія за пожежною безпекою належить до категорії В, тому що в ній знаходяться горючі та важкогорючі матеріали.

Можна зробити висновок, що приміщення лабораторії № 036-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії «Г» (в лабораторії є негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор,

полум'я; горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо) [41]. Найбільш пожежонебезпечним місцем в лабораторії є місце де прокладена електропроводка. Загоряння в приміщенні може спричинитися через коротке замикання в електропроводці [42]. План евакуації із лабораторії в разі виникнення пожежі наведено на рисунку 5.3.

Із засобів пожежогасіння у лабораторії наявні вогнегасники ОУБ-2. Засобами виявлення та оповіщення про пожежу є автоматичні датчики-сигналізатори типу ДТП. Засобом комунікації та оповіщення співробітників про пожежну ситуацію служить внутрішньо-службовий зв'язок. На випадок пожежі існує план евакуації працівників з лабораторії № 036-9.

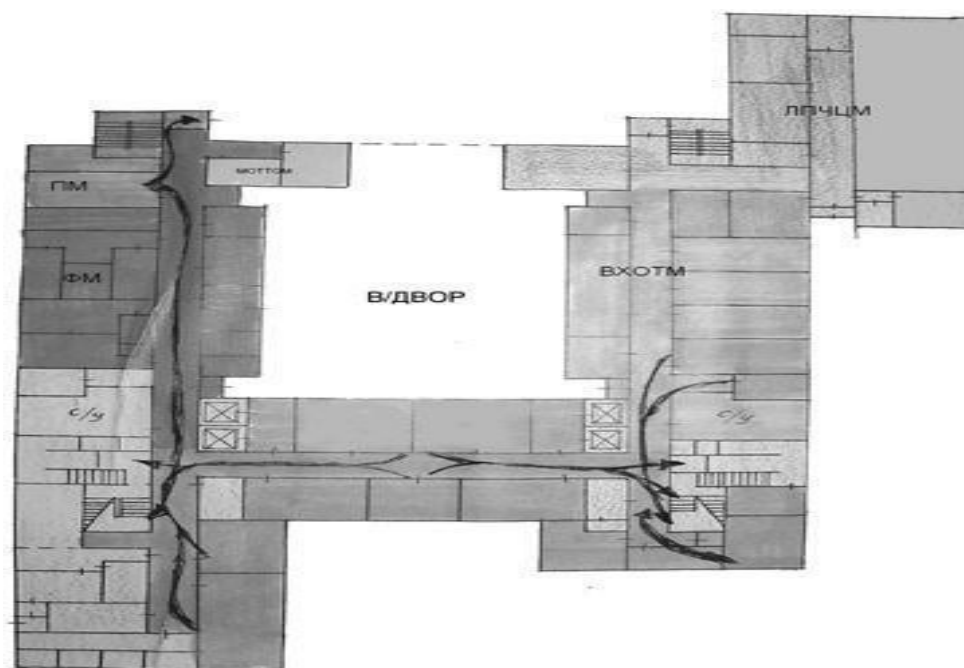


Рисунок 5.3 – План евакуації з лабораторії 036-9

#### 5.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

До видів небезпеки, що можуть статися на виробництві, належать: пожежа; вибух (усередині обладнання, будівлях або навколишньому середовищі); розрив або зруйнування обладнання; викид шкідливих речовин; сполучення перелічених видів небезпеки [40]. З метою запобігання виникненню та ліквідації надзвичайних (аварійних) ситуацій на підприємстві

має бути план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій у відповідності до положення [37]. Під час аналізу небезпеки підприємства (об'єкта) потрібно визначити всі можливі аварійні ситуації і аварії, в тому числі й малоймовірні, з катастрофічними наслідками, які можуть виникати на підприємстві, розглянути сценарії їхнього розвитку і оцінити наслідки. Виявлення можливостей і умов виникнення аварій має виконуватись на основі аналізу особливостей роботи як окремого обладнання (апаратів, машин тощо), так і їх групи (технологічних блоків), а також з урахуванням небезпечних властивостей речовин і матеріалів (вибухо-пожежонебезпечних та шкідливих), що використовуються у виробництві. При цьому слід враховувати параметри стану речовин (температура, тиск, агрегатний стан тощо) і стан обладнання, які відповідають як нормальному технологічному режиму, так і режимам, які можливі при настанні й розвитку аварії.

#### **5.4.1 Пожежна безпека**

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [41] приміщення, у яких виконуються роботи з електродугової металізації, газополуменевого напилювання, плазмового напилювання, детонаційно-газового напилювання та газодинамічного напилювання, за вимогами вибухопожежної небезпеки належить до категорії Г (негорючі речовини й матеріали в гарячому, розжареному, розплавленому станах, процеси обробки яких супроводжуються виділенням променистої теплоти, іскор та полум'я; горючі гази, рідини, тверді речовини, які спалюються чи утилізуються у вигляді палива).

Згідно з ДНАОП 0.00-1.21-98 та ДНАОП 0.00-1.32-01 у приміщенні виділяється зона II-Па, де обертаються тверді горючі речовини. Категорія за БЕМЗ (безпечний експериментальний зазор між фланцями оболонки, мм) – ПА ( $> 0,9$  мм). Група вибухобезпеки сумішей (за температурою самозапалювання) – ТІ (ТС) В  $> 450$  °С. Ступінь вогнестійкості будівлі – І (не допускається поширення вогню на основні будівельні конструкції), мінімально допустиме обмеження вогнестійкості – 2,5 год, максимально



допустиме обмеження поширення вогню для внутрішніх стін – 25 см. Клас пожежі – Е (пов'язаний з аваріями електроустановок) наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Клас пожежі, пов'язаний з аваріями електроустановок

	Клас пожежі				
	А	В	С	Д	Е
Характеристика горючого середовища	Тверді горючі речовини (дерево, папір, текстиль тощо)	ГР та плавильні матеріали (мазут, гас, спирти, лаки, синтетичні матеріали)	ГГ (H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , інші вуглеводні тощо)	Метали та їх сплави (К, Na, Mg)	Електроустановки
Вогнегасні засоби	Усі види (передусім – H <sub>2</sub> O)	Розпилена H <sub>2</sub> O, піни, галоїдовуглеводні (хладони), порошки	Газові сполуки: інертні – N <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , галоїдовуглеводні, порошки (H <sub>2</sub> O – для охолодження)	Порошки (спокійна подача на поверхню горіння)	CO <sub>2</sub> , порошки, галоїдовуглеводні

Пожежна безпека (ГОСТ 12.1.004-91) забезпечується:

- запобігання спалаху ізоляції при КЗ за рахунок максимального струменевого захисту;
- запобігання утворення горючого середовища за рахунок надійної герметизації обладнання, обмеженням застосування і зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин;
- застосування пожежної сигналізації з датчиком (ИДФ-І, ДПД і інш.);
- використання вогнегасників (клас пожежі В): ОХП-10, ОХВП-10, ОВП-7, ОХ-7, ОП-10А; для класу пожежі Е вогнегасники типу УО, ОП-10А

(вибрати тип і кількість відповідно до НАПБ Б.03.002-2007).

При організації технологічного процесу дотримуються всіх вимог електростатичної іскробезпеки.

Передбачається також аварійне зливання пожежонебезпечних рідин, аварійне втручання горючих газів із апаратури.

Рекомендована періодична очистка робочого місця цеху, апаратури від горючих відходів, відкладання пилу, вилучення пожежонебезпечних відходів виробництва, заміна ЛВЖ і ГЖ на пожежонебезпечні технічні миючі засоби.

Передбачено пристрої, які забезпечують обмеження поширення пожежі (описати конкретно).

Приміщення обладнується засобами колективного та індивідуального захисту людей від небезпечних факторів пожежі та протидимного захисту.

Тип виконання електрообладнання в приміщенні повинен відповідати класу зони пожежо- та вибухобезпечності. На ділянках виробничого приміщення, де застосовується електродугова металізація, газополуменеве напилювання, плазмове напилювання, детонаційно-газове напилювання та газодинамічне напилювання, передбачаємо встановлення протипожежних щитів, укомплектованих вуглекислотними вогнегасниками, баграми, ломами, відрами, сокирами. Біля щитів передбачаємо наявність ящиків з піском, сухість якого регулярно перевіряється.

Для автоматичного виявлення пожеж у виробничому приміщенні, в якому застосовується газотермічне напилювання, передбачаємо наявність датчиків, які своєчасно сповіщають про виниклу пожежу і дають команду на вмикання автоматичної системи гасіння пожежі.

#### **5.4.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

У випадку пробою електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника ділянки. У випадку потрапляння кого-небудь під напругу, необхідно відключити електродуговий агрегат від мережі, покласти

потерпілого на дерев'яни настил, підклавши під голову ватник, викликати лікаря за телефоном 103 і, якщо це необхідно, зробити постраждалому штучне дихання. У випадку загорання електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника. Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний: – негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101; – приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на ділянці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо); – викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, ділянки). У випадку одержання травми необхідно довести до відома про це майстра, начальника ділянки та звернутися в медпункт.

### **5.5 Висновки до розділу 5**

1. Всі дослідження, які проводились згідно з планом, і не є джерелом забруднення виробничого середовища. Проведений аналіз шкідливих та небезпечних факторів передбачає умови, за яких може виникнути небезпека ураження організму.

2. Запропоновано заходи для уникнення травмування в процесі підготовки та проведення експериментальних досліджень.

3. Мікроклімат, освітлення, організація робочого місця в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм. А рівень шуму не перевищує допустимих норм.

## ВИСНОВКИ

1. Теоретична побудова розподілу температурного поля за товщиною зразка із Ст3 при різних значеннях шліфування кругом із зерном Р60 показала, що припик може спостерігатись при швидкості шліфування 54 м/с, що й спостерігалось в проведених експериментах.

2. Градієнти температури, які розраховані теоретично, свідчать про неможливість утворення тріщин на поверхні для всіх трьох швидкостей 54 м/с, 67.5 м/с та 80 м/с, що при використаному збільшенні (до  $\times 100$ ) для дослідження мікроструктури зразків зі сталі Ст3 не було виявлено.

3. Дослідження мікротвердості за товщиною відшліфованих зразків показало, що зміна мікротвердості, порівняно з початковим станом, відбулась тільки при шліфуванні зі швидкістю 80 м/с.

4. Дослідження глибини западин поверхні зразків зі сталі Ст3 показало, що їх величина зменшується зі збільшенням швидкості обробки та збільшенням кількості зерен шліфувальних кругів.

5. Визначені режими роботи швидкісного шліфування кутовою шліфмашиною Bosch GWS 850-125 без утворення припиків кругом з електрокорунду діаметром 125 мм типу КПП 1 .

6. Аналіз ринкової спроможності стартап-проекту «Розробка інструкцій щодо шліфування зразків сталі Ст3 кутовою шліфувальною машинкою», засвідчив, що застосування даної технології для обробки будь-яких деталей виготовлених зі сталі Ст3 є дуже перспективним.

7. Визначено, що можливість впровадження даної технології, опираючись на огляд потенційних груп клієнтів, незначна. Однак позитивним моментом є те, що головні конкуренти є потенційними клієнтами, що значно підвищує імовірність співпраці з компаніями.

8. Всі дослідження, які проводились згідно з планом, і не є джерелом забруднення виробничого середовища. Проведений аналіз шкідливих та

небезпечних факторів передбачає умови, за яких може виникнути небезпека ураження організму.

9. Запропоновано заходи для уникнення травмування в процесі підготовки та проведення експериментальних досліджень.

10. Мікроклімат, освітлення, організація робочого місця в лабораторії відповідають вимогам санітарних норм. А рівень шуму не перевищує допустимих норм.

## CONCLUSIONS

1. The theoretical construction of the distribution of the temperature field over the thickness of the sample from St3 at different grinding values with a P60 grain showed that the stove can be observed at a sampling rate of 54 m/s, which was observed in the experiments carried out.

2. The temperature gradients calculated theoretically indicate that it is impossible to create cracks on the surface for all three velocities 54 m/s, 67.5 m/s and 80 m/s, which, with the used increase (up to  $\times 100$ ), for studying the microstructure of samples of steel St3 was not detected.

3. Investigation of microhardness on the thickness of polished samples showed that the change of microhardness, compared with the initial state, occurred only when grinding at a speed of 80 m/sec.

4. Investigation of the depth of the depressions of the surface of samples from steel St3 showed that their value decreases with increasing processing speed and an increase in the number of grains of grinding wheels.

5. The operating modes of high-speed grinding by the angle grinder Bosch GWS 850-125 are determined without the formation of bumps with a circle of an electrically-sintered diameter of 125 mm type PPC 1.

6. Analysis of the market capacity of the startup-project "Development of instructions for grinding steel samples CT3 angle grinder", has shown that the application of this technology for processing any parts made of steel Ct3 is very promising.

7. It is determined that the possibility of introducing this technology, based on an overview of potential client groups, is negligible. However, the positive point is that the main competitors are potential customers, which greatly increases the probability of cooperation with companies.

8. All studies conducted in accordance with the plan and not a source of pollution of the production environment. The analysis of harmful and dangerous factors involves conditions under which there may be a risk of body damage.

9. Measures to prevent injury in the process of preparation and conduct of experimental research are proposed.

10. Microclimate, lighting, organization of the workplace in the laboratory meet the requirements of sanitary norms. And the noise level does not exceed the permissible standards.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марки стали и сплавы. Сталь марки Ст3сп [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://metallischekiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/St3sp](http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stk/St3sp) (дата доступу 27.09.2018).
2. ДСТУ 2651:2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки.
3. Кремень И. З. Технология шлифования в машиностроении / И. З. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин. – С.: Политехника, 2007. – 424 с.
4. Солер Я.И. Количественная оценка прижогов при плоском шлифовании закаленных деталей из стали 40х абразивными кругами различной пористости / Я.И. Солер, Д.Ю. Казимиров, В.Л. Нгуен. – М.: Металлургия, 2015. – 245 с.
5. Рудометов Ю.И. Применение абразивных инструментов, пропитанных суспензиями импрегнаторов / Ю.И. Рудометов. – М.: СТИН, 2012. – 78 с.
6. Лебедев В.Г. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей / В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко, С.А. Аль-Аджейлат. – Луцьк: Вип. 40, 2012 – 143 с.
7. Лебедев В.Г. Формирование прижогов отпуска при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами из КНБ / В.Г. Лебедев, С.А. Аль-Аджейлат. – М.: Политехника, 2007. – 150 с.
8. Лебедев В.Г. Энергетические условия образования прижогов закалки при шлифовании направляющих тяжелых прессов кругами КНБ / В.Г. Лебедев – Луцьк: Вип. 40, 2007. – 244 с.
9. Сулов А.Г. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Сулов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов — М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.
10. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М Терещенко, М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
11. Худобин Л. В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании / Л.В. Худобин. – М.: Машиностроение, 1971. — 214 с.



12. Худобин Л. В. Шлифование композиционными кругами / Л.В. Худобин, И.Н. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. — 256 с.
13. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
14. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. / В.А. Шальнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.
15. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
16. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. / Н.Н. Рыкалин. - М.: Машгиз, 1951. – 269 с.
17. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с.
18. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов - М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
19. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов / Х. Вашуль. – М.: Металлургия, 1988. – 320 с.
20. ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом.
21. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
22. Куц Ю. В. Сучасні методи дослідження мікроструктур за допомогою комп'ютерного матеріалознавства з використанням прикладних програм / Ю. В. Куц, О. Ю. Повстяной. – М: Политехника, 2014. – 329 с.
23. Свидуневич Н. А. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Н. А. Свидуневич, Г. П. Окатова, – М.: Металлургия, 2004. – 212 с.
24. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости поверхности, волнистости и пекруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова, – М: Машиностроение, 1978. – 230 С.

25. Шальнов В.А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. / В.А. Шальнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 272 с.

26. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

27. ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.

28. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

29. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку..

31. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

32. ГОСТ 12.3.002-2014. Процессы производственные. Общие требования безопасности.

33. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

34. ДНАОП 0.00-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

35. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

36. Степанчук А. М. Матеріали для напилювання покриттів: навчальний посібник. / А.М. Ступанчук, І.І. Білик. – Київ: Центр учбової літератури, 2016. – 236 с.

37. Левченко О. Г., Полукаров О. І. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. / О.Г Левченко, О.І. Полукаров. – К.: Основа, 2014 – 314 с.

38. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

39. ДСТУ EN 954-1:2003. Безпечність машин. Елементи безпечності систем керування. Частина 1. Загальні принципи проектування.

40. ДСТУ EN ISO 13849-1:2016. Безпечність машин. Деталі систем управління, пов'язані з забезпеченням безпеки. Частина 1. Загальні принципи проектування».

41. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

42. ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.